



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo e implementazione di moduli in ambiente
Matlab-Simulink per la realizzazione di un simulatore di rete
energetica distribuita

Danilo Sbordone, Luigi Martirano, Maria Carmen Falvo



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

SVILUPPO E IMPLEMENTAZIONE DI MODULI IN AMBIENTE MATLAB-SIMULINK PER LA REALIZZAZIONE DI UN SIMULATORE DI RETE ENERGETICA DISTRIBUITA

Luigi Martirano, Maria Carmen Falvo, Danilo Sbordone (Università Sapienza di Roma, Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale DIAEE – Area Ingegneria Elettrica)

Luglio 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e Valutazioni sull'uso razionale dell'energia: strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

Si vuole ringraziare tutto il gruppo UTEE-GED dell'ENEA, coordinato dall'ingegner Ilaria Bertini. In particolar modo l'Ing. Biagio Di Pietra per la sua costante, attenta e precisa collaborazione nello sviluppo delle differenti fasi del modello. Si ringrazia inoltre l'Ing. Giovanni Puglisi, e tutto il gruppo UTEE per esser stato sempre disponibile e collaborativo, lavorando a stretto contatto e dimostrando professionalità e competenza nelle varie problematiche affrontate. Questo ci ha permesso di completare un lavoro e renderlo perfettamente integrabile a ciò che era stato già sviluppato.

INDICE

1.	Sommario.....	4
2.	Introduzione.....	6
3.	Struttura di un impianto di teleriscaldamento.....	8
3.1.	Centrali termiche.....	8
3.1.1.	Impianti semplici.....	8
3.1.2.	Impianti combinati	9
3.1.3.	Calcolo del rendimento della CTE	11
3.2.	Serbatoi di accumulo	15
3.3.	Struttura della rete.....	17
3.3.1.	Tipi di rete.....	18
3.4.	Caratterizzazione idraulica della rete: cenni e considerazioni.....	22
3.4.1.	Viscosità.....	22
3.4.2.	Numero di Reynolds.....	24
3.4.3.	Equazione di Bernoulli e moto dei fluidi nelle condotte	26
4.	Sviluppo del modello di rete termica per usi civili	29
4.1.	Modello accumulo	32
4.2.	Modello rete a scambiatori.....	34
4.3.	Modello rete a ripartitore di potenza.....	37
5.	Campagna di simulazioni ed analisi dei risultati.....	40
5.1.	Schematizzazione della rete rappresentativa di un caso reale	40
5.2.	Integrazione dei modelli di rete sviluppati con ODESSE	42
5.3.	Simulazioni ed analisi dei risultati di una rete per un singolo edificio	48
5.3.1.	Simulazioni ed analisi con il modello a scambiatori	49
5.3.2.	Simulazioni ed analisi con il modello a ripartitore di potenza	55
5.4.	Simulazioni per valutare la necessità di georeferenziazione	61
5.5.	Simulazioni ed analisi del modello rete complesso con scambiatori.....	64
5.6.	Simulazioni ed analisi del modello rete complesso con ripartizione termica.....	69
6.	Conclusioni	72
7.	Bibliografia.....	75
	Appendice	76

1. Sommario

Il presente rapporto tecnico illustra i risultati ottenuti in relazione alle attività previste dall'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Università di Roma "Sapienza" DIAEE – Sezione di Ingegneria Elettrica, per una attività di ricerca dal titolo "*Sviluppo e implementazione di moduli in ambiente MatLAB Simulink per la realizzazione un simulatore dinamico di rete energetica distribuita*", che si innesta nel Progetto dal titolo "*Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi*", finanziato nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

Oggetto del contratto è la realizzazione di modelli che simulano il comportamento energetico di una rete termica per usi civili, per integrare i modelli già realizzati nella piattaforma *ODESSE* allo scopo di rendere la stessa piattaforma in grado di simulare il comportamento termico di una rete energetica distribuita.

In particolare l'attività ha previsto l'analisi delle problematiche relative alle diverse configurazioni di rete (ad anello chiuso, radiali, ibride) inerenti il comportamento termico in regime stazionario, includendo i componenti impiantistici che realizzano l'interfaccia di collegamento fra la rete e i nodi.

Il contributo del DIAEE nell'ambito di questo contratto si è sviluppato in due fasi:

- Fase A: Definizione e implementazione di modelli per la simulazione del comportamento energetico di una rete termica per usi civili.
- Fase B: Applicazione del modello di rete termica ad una tipologia impiantistica reale.

I risultati sono descritti nel presente rapporto. In particolare l'attività di ricerca ha consentito:

1. la definizione dei modelli energetici della rete termica necessari a collegare i nodi di carico (edifici) e quelli di generazione, basati sul comportamento reale dei sistemi impiantistici in configurazione "generazione distribuita";
2. l'implementazione dei suddetti modelli in ambiente MatLab/Simulink in modo da essere integrabili con i modelli di edificio e di impianti di generazione già realizzati nella piattaforma ODESSE.

2. Introduzione

L'obiettivo del progetto è la definizione ed implementazione di un modello termico di rete di teleriscaldamento in regime stazionario, del tipo ad anello chiuso con il circuito di distribuzione principale separato dal circuito secondario di utenza (sistema indiretto) tramite una sottostazione di scambio termico la quale spesso prende il posto della preesistente caldaia e dove viene anche installata la strumentazione di controllo e di misura.

La configurazione di rete considerata, mostrata in Figura 1, è composta da un sistema a generazione distribuita del calore, di potenza limitata a valori dell'ordine delle centinaia di kW, ed da sistema di distribuzione di tipo radiale avente estensione massima di 2 km. Tale ipotesi è stata frutto di una indagine sugli impianti realmente esistenti in Italia(1).

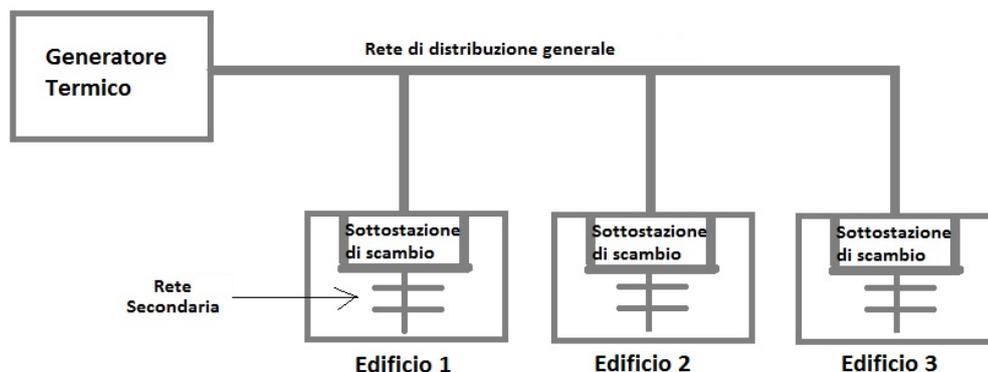


Figura 1 – Tipologia di rete considerata

L'ipotesi di partenza nel modello da implementare prevede che la rete di distribuzione generale ha come punti di utilizzazione del calore le sottostazioni dei singoli edifici, a prescindere dal sistema di distribuzione secondario utilizzato all'interno dell'edificio (sistema a portata costante, sistema a portata variabile, sistemi ibridi).

A tale scopo si è partiti dal considerare una rete di teleriscaldamento con generazione comune e dedicata ad alcuni edifici, in modo da poter simulare e facilmente valutare quale cambiamento apporterebbe in termini energetici il

passaggio da un impianto di riscaldamento autonomo per singolo edificio (con generatore di calore locale) ad uno centralizzato (con generazione comune).

In questo caso l'impatto economico sarebbe contenuto per le dimensioni limitate dell'impianto di generazione e di distribuzione.

3. Struttura di un impianto di teleriscaldamento

Schematicamente un impianto di teleriscaldamento è composto da:

- una o più centrali termiche che producono il calore,
- una rete di trasporto e distribuzione,
- l'insieme delle utenze.

3.1. Centrali termiche

All'interno delle centrali termiche sono presenti i seguenti dispositivi (2):

- apparecchiature per la produzione del calore,
- gli impianti per il trattamento del fluido vettore,
- le pompe per la circolazione dell'acqua,
- il vaso di espansione,
- eventuali accumulatori di calore.

Normalmente le centrali termiche sono costituite da più unità produttive; questa scelta consente sia un maggiore risparmio nei costi di esercizio che una maggiore sicurezza nella continuità delle forniture.

3.1.1. Impianti semplici

Nel caso più semplice la centrale termica è costituita esclusivamente da caldaie con la sola produzione di calore. Un esempio è mostrato in Figura 2.

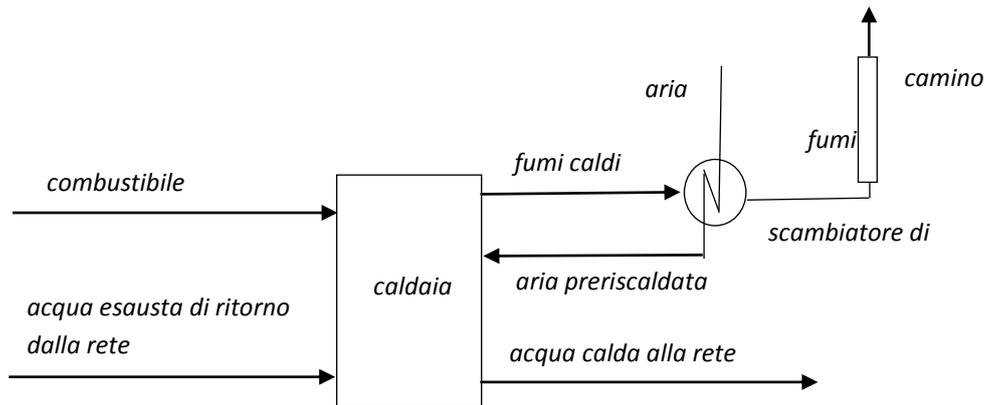


Figura 2 - Ingressi ed uscite di una caldaia

Le caldaie possono scaldare direttamente l'acqua che alimenta la rete, oppure possono produrre vapore che viene poi utilizzato per riscaldare l'acqua tramite degli scambiatori di calore.

Senza un accumulo di adeguate dimensioni, la potenza complessiva installata deve essere pari al fabbisogno di punta incrementato della riserva.

Il rendimento delle caldaie dipende dal loro carico; normalmente tali rendimenti diminuiscono al diminuire del carico.

Se la centrale è costituita da più caldaie è quindi possibile gestire meglio l'esercizio programmando l'accensione delle stesse in funzione del carico complessivo.

In genere i rendimenti energetici delle centrali termiche crescono al crescere della loro potenzialità, questo è dovuto al fatto che, essendo in gioco energie elevate, diviene conveniente introdurre sistemi più complessi per diminuire le perdite di calore.

3.1.2. Impianti combinati

Gli impianti combinati (3), come quelli mostrati in Figura 3, sono progettati e costruiti per produrre sia energia elettrica che calore (nel caso di centrali

termiche di stabilimenti chimici vi può essere una produzione anche notevole di vapore da fornire agli impianti).

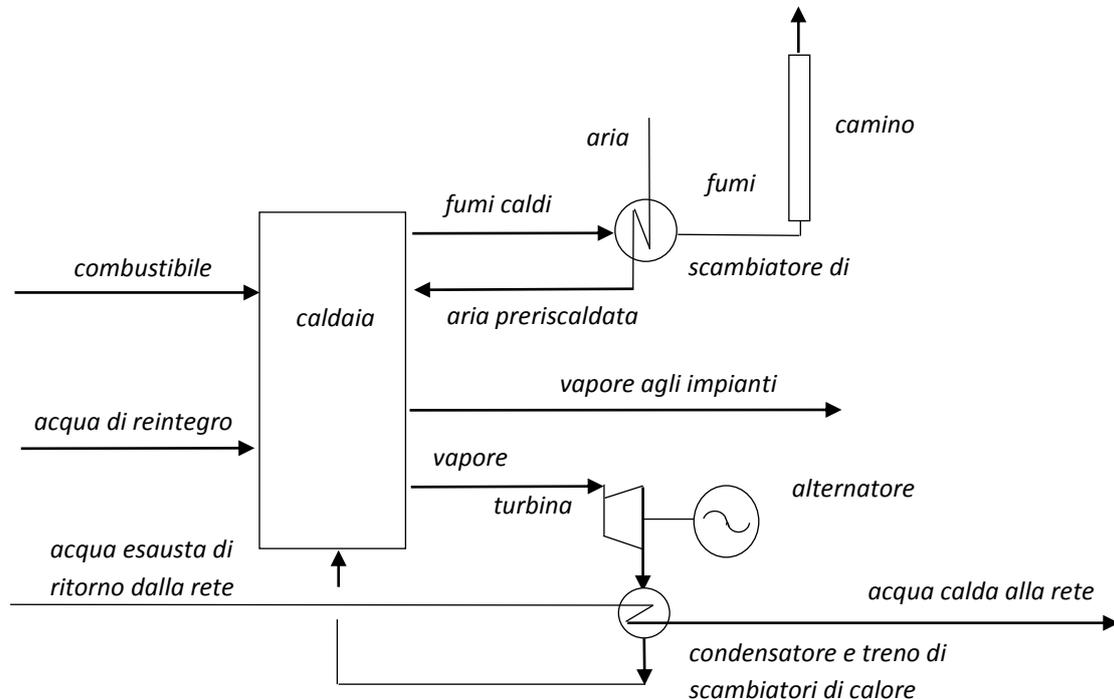


Figura 3 – Schema impianto combinato

Le tipologie e le potenzialità degli impianti combinati possono essere molto diverse, la filosofia che li accomuna è che la potenza elettrica (ed eventualmente il vapore) sono il *prodotto nobile* della trasformazione energetica, il calore fornito alla rete di teleriscaldamento è un sottoprodotto di tali trasformazioni.

Si possono suddividere questi tipi di impianto in tre grandi famiglie:

1. centrali dotate di turbine a vapore in contropressione con condensatori caldi: il calore per la rete di teleriscaldamento viene prelevato dal condensatore o da eventuali spillamenti,
2. centrali a turbogas: il calore per la rete di teleriscaldamento viene ottenuto raffreddando i fumi di scarico,

3. centrali con gruppi Diesel: il calore per la rete di teleriscaldamento viene ottenuto dai gas di scarico, dall'acqua di raffreddamento e anche dall'olio dei motori.

Nel progettare la centrale termica si deve garantire la fornitura anche durante le punte massime di richiesta di energia e contemporaneamente si deve cercare di minimizzare sia i costi di esercizio che quelli di costruzione.

Una soluzione spesso utilizzata è quella di affiancare ai cogeneratori una o più caldaie che producono solo calore; il loro utilizzo è limitato ai periodi di punta, il loro basso rendimento è compensato dal basso costo di costruzione.

3.1.3. Calcolo del rendimento della CTE

Nel ciclo termodinamico di una centrale termica combinata che fornisce calore ad una rete di teleriscaldamento compaiono vettori energetici con caratteristiche molto diverse; schematizzando, come mostrato in Figura 4, si ha:

- in ingresso i combustibili, l'aria e l'acqua esausta proveniente dalla linea di ritorno,
- in uscita l'energia elettrica, l'acqua calda fornita alla rete (ed eventualmente anche vapore),
- le perdite sono sostanzialmente dovute all'irraggiamento e al calore associato ai fumi.

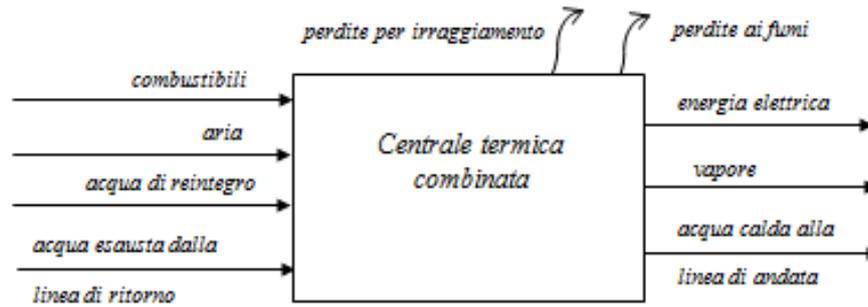


Figura 4 – Effetto utile e perdite per una centrale termica

Per caratterizzare l'efficienza della macchina termica si utilizza il rendimento entalpico (3) che è il rapporto fra l'energia utile prodotta e l'energia impiegata.

Tale rendimento può essere calcolato in due modi:

- nel primo caso l'energia utile prodotta viene calcolata misurando e sommando l'energia collegata ai vari flussi energetici in uscita dalla centrale; tale metodo viene definito *metodo diretto*,
- nel secondo caso l'energia utile viene calcolata come differenza fra l'energia fornita e le perdite; tale metodo viene definito *metodo indiretto*.

In questo secondo caso:

- l'energia fornita viene calcolata utilizzando le misure di portata dei combustibili,
- le perdite (calore ai fumi, irraggiamento, condense ..) vengono calcolate una per una conoscendo il funzionamento della centrale termica.

Rendimento calcolato con il metodo diretto:

$$\eta_{ent} = 100 \cdot \frac{E_{el} + E_{vap} + E_{acq_calda}}{E_{comb} + E_{aria} + E_{acq_es} + E_{acq_rein}} \quad [\%] \quad (1)$$

Rendimento calcolato con il metodo indiretto:

$$\eta_{ent} = 100 \cdot \frac{E_{comb} + E_{aria} + E_{acq_es} + E_{acq_rein} - E_{fumi} - E_{irragg} - E_{varie}}{E_{comb} + E_{aria} + E_{acq_es} + E_{acq_rein}} \quad [\%] \quad (2)$$

ove:

E_{el} è l'energia elettrica prodotta [kWh]

E_{aria} è il flusso entalpico dell'aria:

$$E_{aria} = C_{p_{aria}} \cdot F_{aria} \cdot (T_{aria} - T_0) \quad [\text{kWh}] \quad (3)$$

E_{vap} è il calore associato alla fornitura di vapore:

$$E_{vap} = [C_{p_{acqua}} \cdot (T_{eboll} - T_0) + C_{vap} + C_{p_{vap}} \cdot (T_{vap} - T_{eboll})] \cdot F_{vap} \quad [\text{kWh}] \quad (4)$$

E_{acq_calda} è il calore associato all'acqua calda fornita alla linea di andata:

$$E_{acq_calda} = C_{p_{acqua}} \cdot (T_{acq_calda} - T_0) \cdot F_{acqua} \quad [\text{kWh}] \quad (5)$$

E_{acq_es} è il calore associato all'acqua esausta della linea di ritorno:

$$E_{acq_es} = C_{acqua} \cdot (T_{acq_es} - T_0) \cdot F_{acq_es} \quad [\text{kWh}] \quad (6)$$

E_{acq_rein} è il calore associato all'acqua di reintegro:

$$E_{acq_rein} = C_{acqua} \cdot (T_{acq_rein} - T_0) \cdot F_{acq_rein} \quad [\text{kWh}] \quad (7)$$

E_{comb} è l'energia associata al combustibile:

$$E_{comb} = PcInf_{comb} \cdot F_{comb} \quad [\text{kWh}] \quad (8)$$

E_{fumi} è l'energia associata ai fumi:

$$E_{fumi} = Pc_{fumi} \cdot (T_{fumi} - T_0) \cdot F_{fumi} \quad [\text{kWh}] \quad (9)$$

E_{irragg} è l'energia irraggiata dalla centrale termica [kWh]

(l'energia irraggiata è una funzione della temperatura ambiente, viene normalmente calcolata in base alle curve caratteristiche di dispersione del calore fornite dai costruttori della centrale).

E_{varie} è la somma di altre perdite. [kWh]

(ad esempio condense, spurghi, soffiature)

Essendo:

C_{acqua} il calore specifico dell'acqua [kWh / (kg °C)]

Cp_{aria} il calore specifico a pressione costante dell'aria [kWh / (kg °C)]

Cp_{vap} il calore specifico a pressione costate del vapore [kWh / (kg °C)]

$Cvap$ il calore di vaporizzazione dell'acqua [kWh/kg]

$PcInf_{comb}$ il potere calorifico inferiore del combustibile [kWh/kg]

F_{vap} la portata del vapore fornito [kWh/h]

F_{acq_es}	la portata dell'acqua esausta	[kg/h]
F_{acq_rein}	la portata dell'acqua di reintegro	[kg/h]
F_{aria}	la portata dell'aria	[kg/h]
F_{comb}	la portata del combustibile	[kg/h]
F_{fumi}	la portata dei fumi	[kg/h]
T_0	la temperatura di riferimento nel calcolo delle entalpie	[°C]
T_{acq_es}	la temperatura dell'acqua esausta	[°C]
T_{acq_rein}	la temperatura dell'acqua di reintegro	[°C]
T_{fumi}	la temperatura dei fumi	[°C]
T_{aria}	la temperatura dell'aria	[°C]
T_{vap}	la temperatura del vapore	[°C]
T_{eboll}	la temperatura di ebollizione dell'acqua a 1 ata (=100 °C)	[°C]

3.2. Serbatoi di accumulo

Le richieste di calore presentano notevoli variazioni sia stagionali che giornaliere; ne consegue che il carico termico della rete non è costante, ma varia nel tempo. Una gestione ottimale delle centrali termiche richiede che le loro condizioni operative non subiscano brusche variazioni. In questo modo si possono raggiungere le condizioni ottimali di funzionamento.

Un modo per stabilizzare la loro produzione è quello di inserire dei serbatoi di accumulo di calore che immagazzinano calore nei periodi in cui la richiesta di calore della rete è bassa e lo restituiscono nei periodi in cui tale richiesta ha dei

picchi positivi. Durante la fase di accumulo una pompa provvede a trasferire una quantità d'acqua dalla linea di andata al serbatoio (contemporaneamente la stessa quantità d'acqua viene inviata dal serbatoio nella linea di ritorno). Durante la fase di rilascio si attua il processo inverso: parte dell'acqua calda del serbatoio viene inviata ad alimentare la linea di andata (contemporaneamente una stessa quantità d'acqua viene prelevata dalla linea di ritorno). Sia durante la fase di accumulo che in quella di rilascio del calore il livello del serbatoio rimane costante. Le fasi sono mostrate schematicamente in Figura 5.

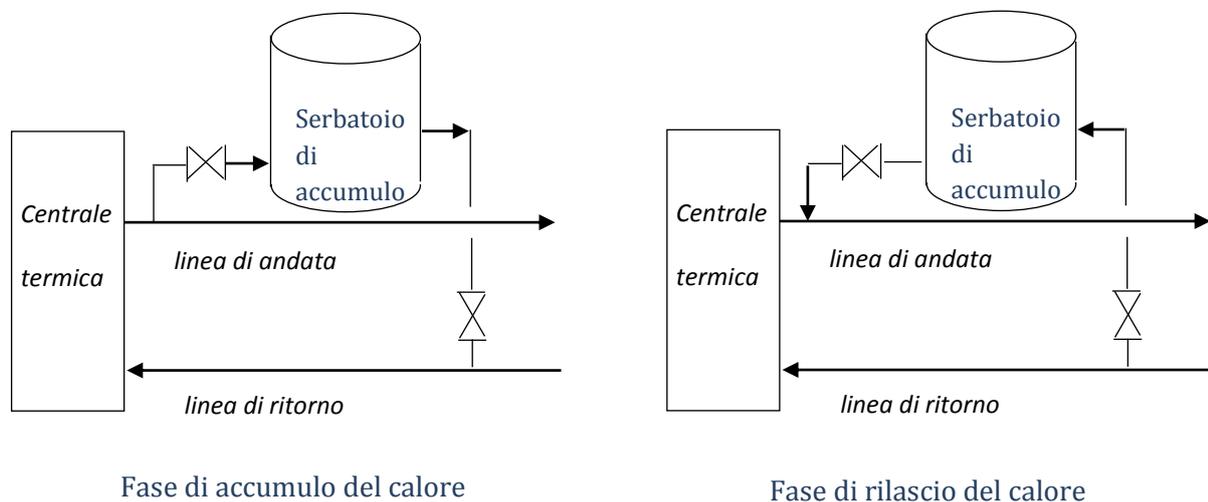


Figura 5 – Prelievo e cessione di calore nell'accumulo

La capacità di immagazzinamento del calore è proporzionale al volume del serbatoio e alla differenza di temperatura fra la linea di andata e quella di ritorno.

La prevedibilità dei periodi di maggiore e minore richiesta di calore da parte della rete consente di programmare in anticipo gli accumuli e i rilasci di calore. Come si noterà più avanti, la rete stessa può considerarsi un accumulo, avendo al suo interno una quantità di fluido termovettore non trascurabile.

3.3. Struttura della rete

Con il termine *rete* si intende tutto l'insieme delle apparecchiature che concorrono a trasportare l'acqua calda dai punti di alimentazione alle utenze e a riportare l'acqua esausta alle centrali. La rete è costituita da una linea di andata e da una di ritorno; la linea di andata trasporta l'acqua calda dalle centrali termiche alle utenze, la linea di ritorno trasporta l'acqua esausta dalle utenze alle centrali termiche. La rete funziona a circuito chiuso: le utenze sono tutte costituite da scambiatori di calore che prelevano acqua calda dalla linea di andata e scaricano l'acqua esausta nella linea di ritorno. La pressione della linea di andata è imposta dalle sorgenti regolate in pressione, e la pressione della linea di ritorno è invece governata dal gruppo di pressurizzazione.

La rete viene descritta mediante un grafo orientato, ove:

- gli archi sono gli elementi costituenti la rete,
- i nodi sono i punti di incontro fra due o più elementi.

Gli elementi possono essere:

- sorgenti (alimentazioni alla rete),
- tronchi di condotta,
- pompe,
- valvole di riduzione della pressione,
- perdite di carico concentrate,
- valvole di intercettazione,
- utenze.

3.3.1. Tipi di rete

Possiamo suddividere le reti in (4):

- reti ad albero,
 - reti pseudo-ramificate,
 - reti magliate.
- Le reti ad albero (dette anche reti ramificate) sono caratterizza dall'avere una sola alimentazione e da non presentare maglie, come mostrato Figura 6.

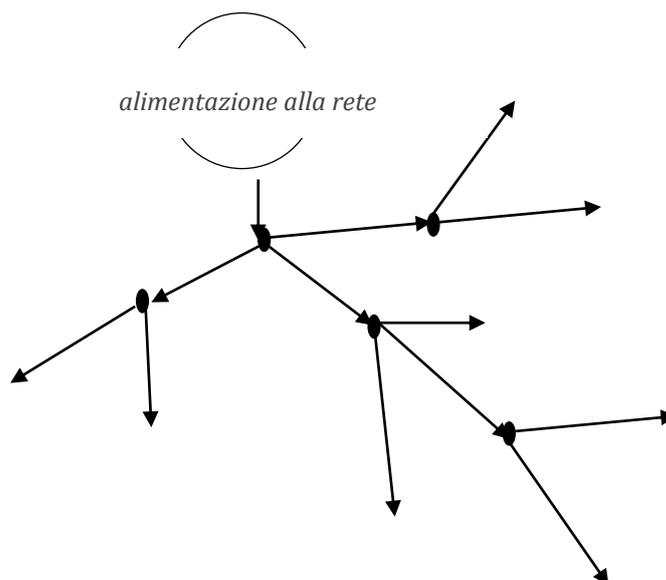


Figura 6 – Schema di rete ad albero

- Le reti pseudo-ramificate non hanno maglie, ma sono alimentate da più di una alimentazione (Figura 7)

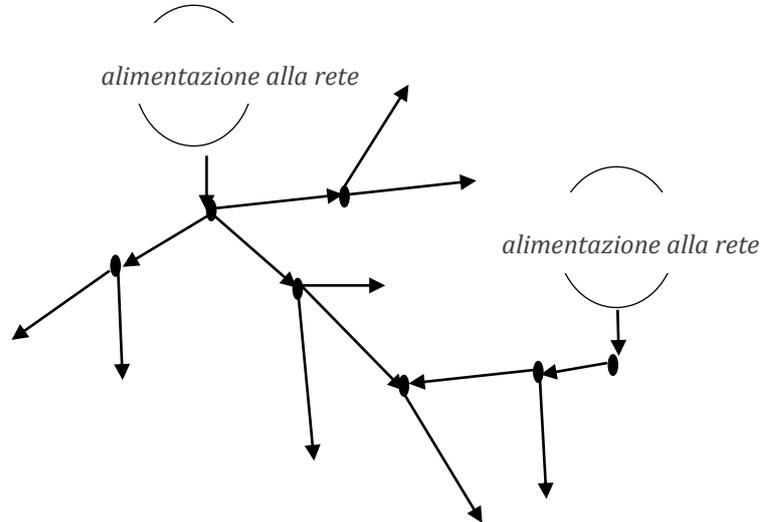


Figura 7 – Schema di rete pseudo-ramificata

- Le reti magliate presentano nel loro interno uno o più circuiti chiusi (Figura 8).

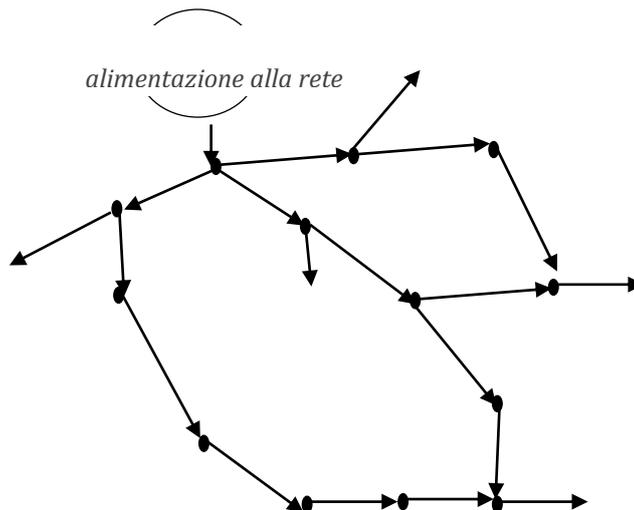


Figura 8 – Schema di rete magliata

Nelle reti ad albero le portate hanno un verso prefissato; l'eventuale interruzione di un ramo interrompe il flusso dell'acqua in tutta la parte a valle.

Nelle reti pseudo-ramificate e nelle reti magliate il verso nelle portate nei vari tronchi può cambiare al cambiare delle condizioni operative. Infatti, se si interrompe un ramo, la rete cambia aspetto, ma l'acqua può circolare ugualmente.

Una rete ad albero presenta una maggiore semplicità di gestione; è semplice prevedere il suo comportamento in caso di anomalie e soprattutto è agevole isolare intere sezioni di rete.

Per contro il guasto in un tronco comporta l'interruzione del servizio a tutte le utenze situate a valle. I vantaggi di una rete magliata (o pseudo-ramificata) sono essenzialmente dovuti al fatto che è più "elastica". La chiusura di un ramo può essere supportata dagli altri, inoltre la sua stessa struttura le consente di sopportare meglio picchi locali delle richieste delle utenze. In una struttura a maglia, infatti, i carichi tendono a distribuirsi su tutta la struttura, in particolare si nota che se le utenze di una zona aumentano, l'incremento del carico viene suddiviso anche fra i rami delle maglie vicine.

Per contro le reti magliate sono più difficili da gestire:

- innanzitutto risulta più complesso isolare zone di rete,
- inoltre nel caso di una chiusura di un ramo l'assetto della rete può cambiare anche notevolmente, al punto che le portate di alcuni tronchi si invertano.

In Figura 9 ne è mostrato un esempio:

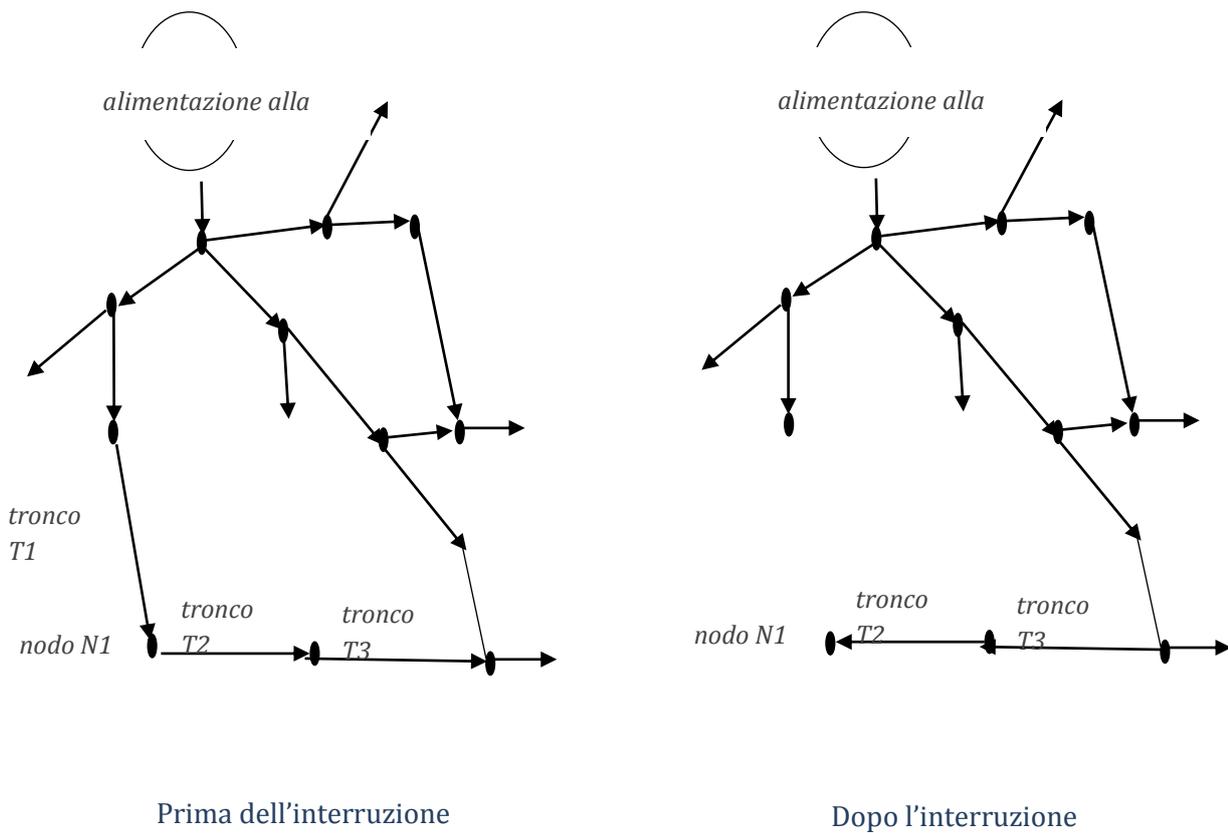


Figura 9- Esempio di riadattamento della rete nel caso si verifici un guasto

Quando il tronco *T1* viene messo fuori servizio la rete a valle continua a funzionare e le portate dei tronchi *T2* e *T3* si invertono.

Una caratteristica importante delle reti di distribuzione è il numero e la localizzazione delle alimentazioni.

E' evidente che se le alimentazioni sono più di una è più facile garantire che la pressione si mantenga nei limiti voluti al variare delle portate delle utenze.

3.4. Caratterizzazione idraulica della rete: cenni e considerazioni

Di seguito si illustrano brevemente le relazioni ed i parametri idraulici (5) che sono stati calcolati per ogni rete implementata nelle simulazioni. Tale passaggio si rende necessario per due motivi:

- 1) verificare che la reti ipotizzate siano fattibili
- 2) calcolare, in linea di massima, la potenza elettrica della pompa attraverso la perdita di pressione dal punto iniziale al punto finale della rete

Il calcolo di quest'ultimo valore è stato previsto nell'ottica dell'integrazione totale del modello di rete termica con il modello di rete elettrica, in modo tale che si potrà tenere conto del consumo e dell'influenza della pompa di circolazione sul carico elettrico totale.

3.4.1. Viscosità

La viscosità misura la resistenza che un fluido oppone quando è sottoposto ad una forza di taglio. Essa è dovuta principalmente all'interazione fra le molecole del fluido. Si considerino due lastre parallele separate da una breve distanza y immerse nel fluido da esaminare; se si fissa la lastra inferiore e si sottopone la lastra superiore ad una forza costante F , la lastra si muoverà ad una velocità costante v , come schematizzato in Figura 10

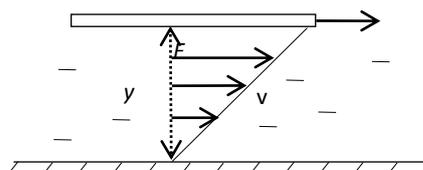


Figura 10 – Andamento di un fluido all'interno di due lastre parallele

Il fluido a contatto con la lastra superiore aderirà ad essa e si muoverà con velocità v , il fluido a contatto con la superficie inferiore avrà invece velocità nulla.

Se la distanza y e la velocità v non sono troppo grandi, la velocità del fluido varia linearmente in funzione della quota.

Per molti tipi di fluidi la forza F è direttamente proporzionale all'area e alla velocità della lastra e inversamente proporzionale alla distanza y .

Tali fluidi sono detti fluidi *newtoniani*; l'acqua appartiene a questa categoria.

In formula:

$$F = \frac{\mu \cdot S \cdot v}{y} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

Viscosità dinamica

La viscosità dinamica μ è la forza cui deve essere sottoposta una lastra di area unitaria quando la variazione di velocità relativa v/y è uguale ad 1.

L'unità di misura della viscosità dinamica μ è il *Poise*.

$$1 \text{ Poise} = \frac{1 \text{ Dine} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = \frac{0.1 \text{ Newton} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

Normalmente si utilizza il sottomultiplo *centipoise*:

$$1 \text{ centipoise} = 0.01 \cdot \text{Poise}$$

La viscosità dinamica dell'acqua dipende dalla temperatura ed è praticamente indipendente dalla pressione.

Viscosità cinematica

La viscosità cinematica è definita come rapporto fra la viscosità dinamica e la densità del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (11)$$

L'unità di misura della viscosità cinematica è lo *stoke*.

$$1 \text{ stoke} = \frac{1 \text{ cm}^2}{\text{s}} = \frac{10^{-4} \text{ m}^2}{\text{s}}$$

La viscosità cinematica dell'acqua dipende dalla temperatura ed è praticamente indipendente dalla pressione.

3.4.2. Numero di Reynolds

Il numero di Reynolds è un numero adimensionale che misura il rapporto fra tali forze.

- Se prevalgono le forze viscosi il moto è laminare: i filetti di fluido scorrono uno accanto all'altro senza mescolarsi.
- Se viceversa prevalgono le forze di inerzia i filetti di fluido si mescolano fra di loro ed il moto assume un aspetto turbolento.

Nel caso di fluidi che si muovono in tubazioni a sezione circolare il numero di Reynolds vale:

$$NR = \frac{v \cdot Diam}{\nu} \quad [\text{numero adimensionale}]$$

E' conveniente esprimere il numero di Reynolds in funzione della portata ponderale invece che della velocità:

$$NR = \frac{\frac{F}{\rho \cdot S} \cdot Diam}{\nu} = \frac{F \cdot Diam}{\frac{\pi}{4} \cdot Diam^2 \cdot \rho \cdot \nu} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{Diam \cdot \rho \cdot \nu} \quad [\text{numero adimensionale}] \quad (12)$$

Ove:

NR - numero di Reynolds [numero adimensionale],

v - velocità media del fluido [m/s],

ν - viscosità cinematica del fluido [m²/s],

ρ - densità del fluido [kg/m³].

Il numero di Reynolds caratterizza lo stato di moto del fluido, che è laminare per $Re \leq 2000$ ed è turbolento per $Re > 3500$.

3.4.3. Equazione di Bernoulli e moto dei fluidi nelle condotte

L'equazione di Bernoulli (6) è diretta conseguenza del suo teorema, il quale enunciato è: "in qualunque sezione di un condotto nel quale si muove un fluido perfetto in regime stazionario la somma della pressione del fluido, della pressione dinamica e di quella idrostatica è costante." Per i fluidi ideali, vale l'equazione 13.

$$\frac{w_2^2}{2} + g \cdot z_2 + v \cdot p_2 = \frac{w_1^2}{2} + g \cdot z_1 + v \cdot p_1 \quad (13)$$

Dove: w è la velocità del fluido, z_i rappresentano le corrispondenti altezze delle sezioni di entrata ed uscita del fluido; P_i è la pressione che spinge il fluido nel condotto;

L'equazione (13), se si considera il bilancio dell'energia meccanica in regime stazionario senza scambio di lavoro e per un fluido reale a densità costante, effettuando opportune semplificazioni, diventa:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + R = 0 \quad (14)$$

Dove il termine R rappresenta la produzione di Entropia legata ai fenomeni di irreversibilità che si manifestano nel moto dei fluidi reali; ovvero il lavoro, sempre positivo, svolto dalle forze di attrito.

Il calcolo di R , che rappresenta le perdite di carico, nel caso di flusso in condotto circolare rettilineo in regime stazionario isoterma, è rappresentato da:

$$R = \frac{8 \cdot \mu \cdot L \cdot \omega}{\rho \cdot r^2} \quad (15)$$

Dove:

μ è la viscosità

r è il raggio del condotto

L è la lunghezza

ω è la densità del flusso

ω è la velocità del flusso

Introducendo il diametro del condotto $D=2r$, si ricava la (16)

$$R = f \frac{L \cdot \omega^2}{D \cdot 2} \quad (16)$$

f è un coefficiente detto fattore di attrito. Quest'ultimo dipende dal numero di Reynolds. Per valori di tale numero fino a 10^5 si può utilizzare la formula di Blasius (7), riportata in (17).

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (17)$$

Per il calcolo della potenza della pompa elettrica di circolazione, si ricava dapprima le perdite distribuite di pressione tra la sezione di ingresso e la sezione di uscita del tubo attraverso la relazione di Darcy:

$$\Delta p = f \cdot \rho \frac{\omega^2 \cdot L}{2 \cdot D} \quad (18)$$

Successivamente si tiene conto anche delle perdite concentrate, valutate come un 10% delle perdite distribuite. La potenza del fluido, quindi, sarà uguale a:

$$Potenza\ fluido = \frac{L}{\tau} = \frac{\Delta p * G}{\rho} \quad (19)$$

Avendo la potenza del fluido, la si divide per il rendimento del motore elettrico, e si ricava la potenza elettrica necessaria alla circolazione del fluido.

$$Potenza\ elettrica = \frac{Potenza\ fluido}{rendimento\ pompa\ circolazione} \quad (20)$$

4. Sviluppo del modello di rete termica per usi civili

In un primo step, si è proceduto allo sviluppo del modello della rete effettuando una semplificazione, e quindi considerando un tratto che va da un punto di generazione ad un punto di carico. Ciò è stato effettuato attraverso il ben noto modello termico di un tubo che trasporta un fluido caldo in regime stazionario (7).

Inizialmente, l'ipotesi del regime stazionario è stata valutata come accettabile in considerazione delle condizioni di funzionamento previste per le reti di distribuzione attualmente presenti con perdite di distribuzione costanti.

Nell'ipotesi di regime stazionario, nota la temperatura del fluido nel punto di immissione (T_0), e considerando:

- la temperatura ambiente del terreno circostante la tubazione T_a sia uniforme;
- la temperatura T del fluido sia funzione soltanto della distanza (x) e non vari sulla sezione (S);
- le proprietà termofisiche del fluido non varino con la temperatura;
- la portata del fluido costante;
- la messa in posa dei tubi non è soggetta ad inclinazioni

è possibile calcolare l'andamento della temperatura lungo il tubo, secondo la formula:

$$T(x) = T_a + [(T)_0 - T_a] e^{-\frac{2\pi r H}{G\gamma} x} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (21)$$

dove:

G: Portata del fluido [kg/s]

H: trasmittanza del tubo [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

r: raggio del tubo sezione circolare [m]

$\tilde{\alpha}$: Calore specifico [J/kgK]

In Figura 11 è mostrato l'andamento della temperatura di rete al variare della distanza tra il gruppo di generazione e l'utenza termica in un caso di esempio.

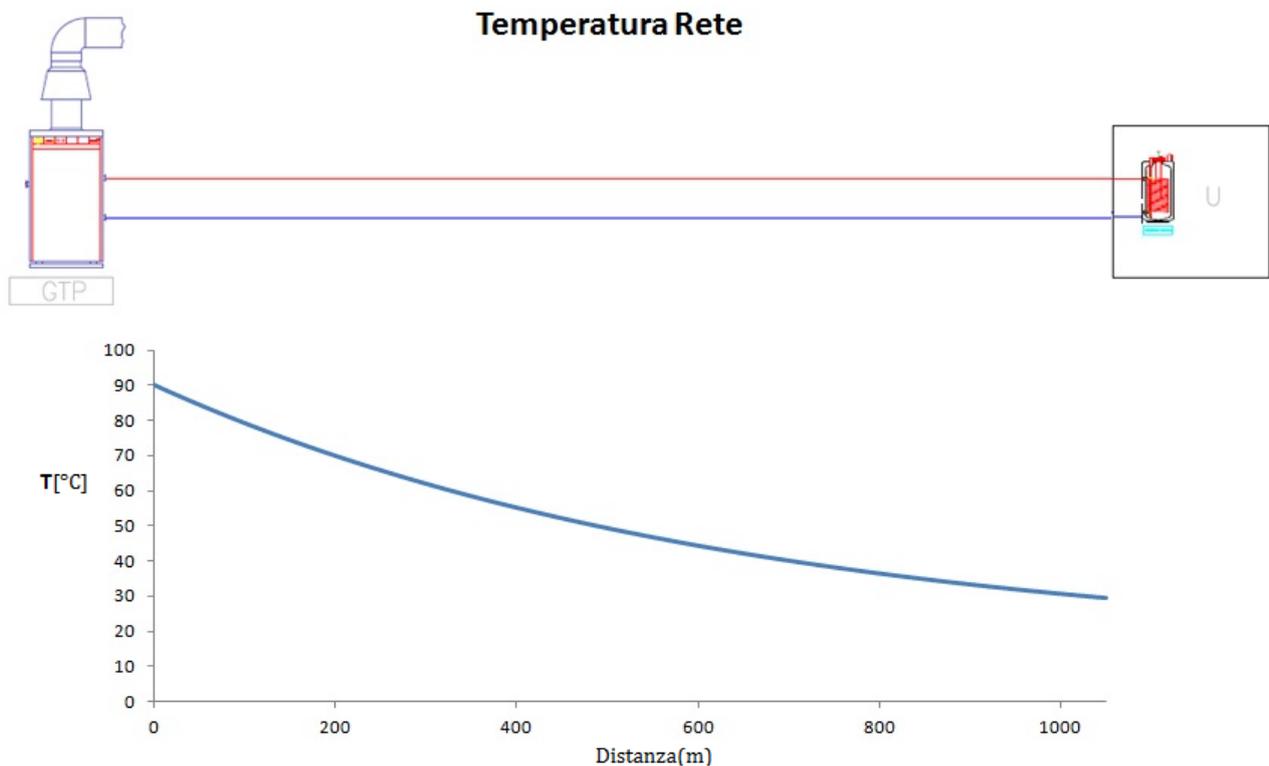


Figura 11 – Andamento della temperatura al variare della distanza

Come si vedrà successivamente, tale semplificazione è valida solo se si ipotizza:

- a) un'accensione 24 ore su 24 del generatore termico primario durante i mesi invernali di funzionamento;
- b) un volume della rete che abbia un'inerzia tale da non influire sulle varie richieste di carico degli edifici connessi.

Tale modello risulta incompleto nel momento nel quale si voglia programmare o gestire in maniera differente l'accensione del generatore termico principale. Questo perché in tale rappresentazione non è presente una variabile di stato

che tenga conto del volume totale del fluido termovettore presente nella rete, e dell'energia termica in esso contenuta. Per questo motivo si è deciso di schematizzare la rete con un accumulo di volume pari al volume della rete stessa. In questo modo si terrà conto dell'inerzia della rete, alle varie richieste termiche che si avranno dalle utenze ad essa collegate. Schematizzando, il modello di rete implementato è composto da due sottomodelli:

- L'accumulo, che caratterizza l'inerzia termica della rete

- La rete fisica, che tiene conto della differenza di temperatura tra il punto di immissione del fluido termovettore e del punto di prelievo dei vari edifici.

A livello di implementazione, sono stati realizzati due modelli diversi di rete fisica, che gestiscono in maniera differente lo scambio di calore con gli edifici:

- Modello a ripartizione di potenza

- Modello con scambiatori di calore

Il primo considera la differenza di temperatura tra quella che il fluido termovettore ha all'ingresso dell'edificio, e la temperatura media dell'accumulo interno all'edificio.

Il secondo considera l'implementazione degli scambiatori di calore in modo da conoscere la temperatura del fluido termovettore presente nella rete sia in

ingresso agli edifici, sia in uscita successivamente allo scambio di calore. I vantaggi e gli svantaggi di una rappresentazione piuttosto che un'altra sono mostrati in Tabella 1.

Configurazione	Vantaggi	Svantaggi
Ripartizione di potenza	➤ Facilmente implementabile all'aumentare dei nodi	➤ Non si esegue un'analisi puntuale delle temperature del fluido termovettore in uscita dagli edifici
Modello con scambiatori di calore	➤ Dettagliato nella gestione delle temperature in ogni punto della rete	➤ Complesso e difficilmente scalabile

Tabella 1 – Caratteristiche dei modelli implementati

4.1. Modello accumulato

Il modello prevede di gestire i flussi di potenza termica in entrata e in uscita dalla rete come se fossero forniti e/o prelevati da un accumulato termico. In questo modo, al variare della potenza richiesta dagli edifici, si calcola la potenza fornita alla rete tramite il generatore termico e si ricava, tramite un'equazione differenziale, la temperatura di accumulato che corrisponde alla temperatura media di rete:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\left[Q_{aux} - Q_{load} - \left(\frac{KRE}{1000} \right) * FFRE * V_{accRE} * (T_t - T_{amb}) \right]}{C_{p_h} * 1000 * V_{accRE}} \quad [kW] \quad (22)$$

Nella Tabella 2 è stato schematizzato l'accumulo:

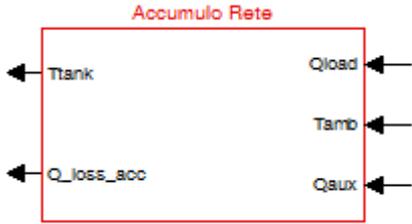
	Variabili di ingresso:	Variabili di uscita:	Parametri
 <p>The diagram shows a rectangular box labeled 'Accumulo Rete'. On the right side, three arrows point into the box labeled 'Qload', 'Tamb', and 'Qaux'. On the left side, two arrows point out of the box labeled 'Ttank' and 'Q_loss_acc'.</p>	<p>Q_{load}: potenza richiesta all'accumulo</p> <p>T_{amb}: temperatura dell'ambiente dove è inserito l'accumulo</p> <p>Q_{aux}: potenza fornita</p>	<p>T_{tank}: temperatura media del fluido all'interno</p> <p>Q_{loss_acc}: perdita di potenza dovuta alle caratteristiche chimico-fisiche dell'accumulo e del fluido termovettore</p>	<p>$FFRE$: fattore di forma dell'accumulo;</p> <p>KRE: trasmittanza termica dell'accumulo;</p> <p>Cp_h: capacità termica del fluido termovettore.</p> <p>V_{accRE}: volume della rete</p>

Tabella 2 – Descrizione accumulo di rete

4.2. Modello rete a scambiatori

Tale modello prevede la presenza degli scambiatori di calore all'interno sia dei dispositivi attivi, quali possono essere generatore termici, sia negli edifici e quindi nella sottostazione di scambio. Ciò che si è implementato è un modello puntuale che riproduce puntualmente le perdite di rete ed è in grado di calcolare la temperatura del fluido termovettore sia all'interno della rete, sia in entrata che in uscita da ogni edificio, in base alla richiesta termica di quest'ultimo. Partendo dal lato di generazione e proseguendo sino all'edificio, la rete è quindi formata da:

- uno scambiatore di calore lato generazione che è installato per aumentare la temperatura del fluido termovettore all'interno della rete

- la rete centrale che è composta da:
 - un modello di accumulo che tiene conto del volume totale del fluido termovettore e quindi dell'inerzia termica presente nelle tubazione;
 - un modello che rappresenta il tubo lineare tenendo conto del calo di temperatura alla variare della distanza dal punto di generazione

- N scambiatori di calore presenti dall'edificio 1 all'edificio Nesimo, che tengono conto delle sottostazioni di scambio termico presenti all'interno dell'edificio, e attraverso i quali è possibile calcolare la potenza ceduta dalla rete all'edificio, e la temperatura di uscita del fluido termovettore dall'edificio.

Nei paragrafi precedenti sono stati modellizzati l'accumulo termico e il tubo lineare. L'unico legame matematico non presente è dettato dallo scambiatore di calore. Per quest'ultimo è stata utilizzata il modello per scambiatori a piastre

Il modello centrale della rete a scambiatori di calore è rappresentato in Figura 13 dove si ha il macroblocco ed il dettaglio delle sue funzioni. Come si può notare, schematicamente nel dettaglio, è presente sia la parte che simula l'accumulo termico, sia la parte relativa al calcolo delle temperature all'ingresso degli edifici in funzione delle tubazioni e degli isolanti attorno ad essi scelti.

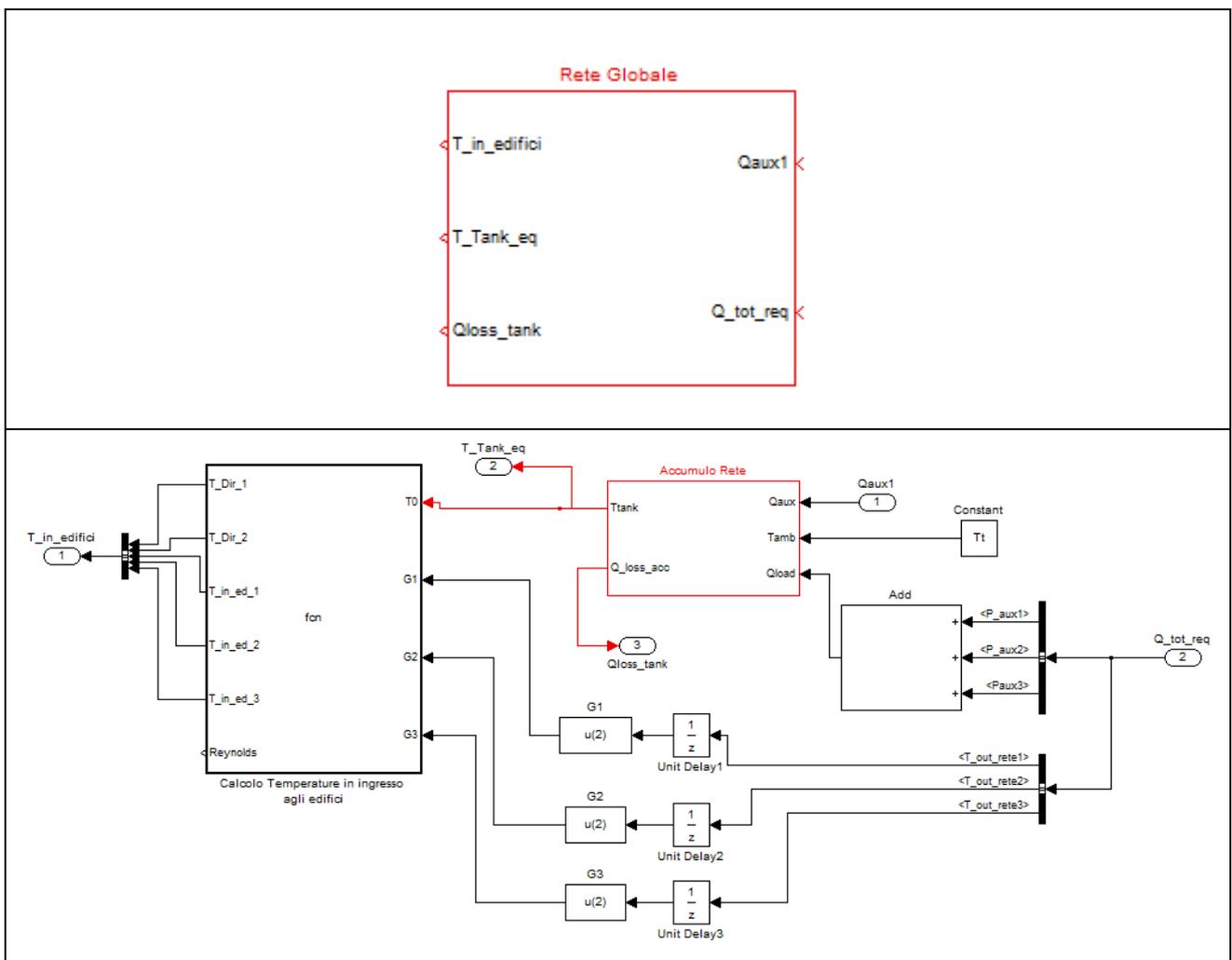


Figura 13 – Schema globale e schema dettagliato del modello rete a scambiatori in simulink

La logica di funzionamento di tale modello, prevede che:

- 1) la potenza sia fornita dal generatore termico principale alla rete all'accumulo incrementando la temperatura media di rete

- 2) la temperatura media di rete in uscita dal modello dell'accumulo, è utilizzata come temperatura in ingresso al tubo di distribuzione
- 3) è considerato il modello matematico del tubo, visto nei paragrafi precedenti, per il calcolo delle temperature in ingresso agli edifici

Una volta che si ha la temperatura del fluido termovettore in ingresso agli edifici, lo scambiatore di calore all'interno dell'edificio cede parte del calore a quest'ultimo, diminuendo la sua temperatura. Le potenze termiche cedute dagli scambiatori agli edifici sono sommate e sono collegate alla potenza richiesta all'accumulo della rete.

4.3. Modello rete a ripartitore di potenza

Tale modello consiste nel calcolo analitico della potenza ceduta dalla rete all'edificio analizzando le differenze di temperatura tra la temperatura del fluido termovettore presente all'interno della rete all'ingresso dell'*i*-esimo edificio, e la temperatura dell'accumulo interno all'*i*-esimo edificio. La parte centrale è sostanzialmente simile a quella illustrata precedentemente, ma a differenza del modello a scambiatori, il calcolo della potenza ceduta all'*i*-esimo edificio avviene direttamente nella rete. Una volta calcolato il valore di potenza che la rete deve cedere all'edificio, tale potenza è fornita direttamente all'accumulo interno all'edificio *i*-esimo. Il modello è mostrato in Figura 14.

<p style="text-align: center; color: red;">Rete Globale</p>	<pre> function [T_Dir_1,T_Dir_2,T_in_ed_1,T_in_ed_2,T_in_ed_3,Q_loss_tot,Q_loss_1,Q_loss_2,Q _richiesta_ed_1,Q_richiesta_ed_2,Q_tot_req,Q_in_ed_1,Q_in_ed_2,Q_in_ed_3] = fcn(Qaux,T_tank1,T_tank2,T_tank3,Tt,T0,Diam,Krete,G1,G2,G3,cp_ft,contr1,contr2 ,contr3,L0,L1,L2,L3,L4) %Tt=Temperatura del terreno (gradi C) %T0=Temperatura fluido termovettore in ingresso(gradi C) %Diam=Diametro tubazione(Metri) %Krete=Trasmittanza totale della tubatura+coibentazione (W/m^2K) %G=Portata fluido (kg/s) %cp_ft(J/kgK) calore specifico %Lrete (Metri) %Ttank (gradi C) - Temperatura media di accumulo all'interno dell'edificio %Rendimento_scambio - Rendimento di scambio termico dalla rete all'accumulo %C capacità termica (J/kgK) Gtot=G1+G2+G3; T_Dir_1=Tt+(T0-Tt)*exp((-pi*Diam*Krete*L0)/(Gtot*cp_ft)); %Temperatura alla diramazione numero 1 T_in_ed_1=Tt+(T_Dir_1-Tt)*exp((-pi*Diam*Krete*L1)/(G1*cp_ft)); T_Dir_2=Tt+(T_Dir_1-Tt)*exp((-pi*Diam*Krete*L2)/((Gtot-G1)*cp_ft)); %Temperatura alla diramazione numero 2 T_in_ed_2=Tt+(T_Dir_2-Tt)*exp((-pi*Diam*Krete*L3)/(G2*cp_ft)); T_in_ed_3=Tt+(T_Dir_2-Tt)*exp((-pi*Diam*Krete*L4)/(G3*cp_ft)); if (T_in_ed_1-T_tank1)>0 Q_richiesta_ed_1=(G1*cp_ft*(T_in_ed_1-T_tank1)/1000)*contr1; %kW Q_in_ed_1=Q_richiesta_ed_1; else Q_richiesta_ed_1=0; Q_in_ed_1=0; end if (T_in_ed_2-T_tank2)>0 Q_richiesta_ed_2=(G2*cp_ft*(T_in_ed_2-T_tank2)/1000)*contr2; %kW Q_in_ed_2=Q_richiesta_ed_2; else Q_richiesta_ed_2=0; Q_in_ed_2=0; end if (T_in_ed_3-T_tank3)>0 Q_richiesta_ed_3=(G3*cp_ft*(T_in_ed_3-T_tank3)/1000)*contr3; %kW Q_in_ed_3=Q_richiesta_ed_3; else Q_richiesta_ed_3=0; Q_in_ed_3=0 end </pre>
---	---

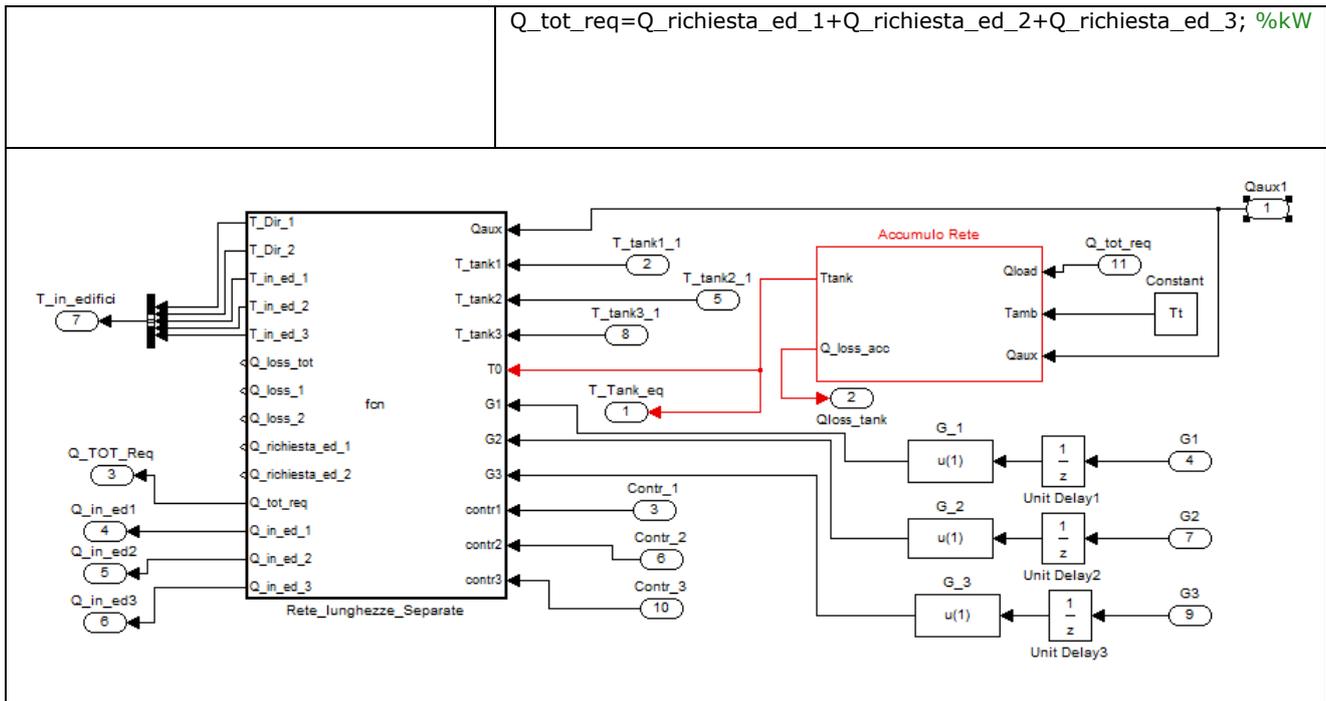


Figura 14 - Schema globale e schema dettagliato del modello rete a ripartizione di potenza in simulink

$$Q_i(in_i(ed_i)) = \eta * G_i * C_{pft} * (T_i(in - [ed]_i) - T_i(tank - [ed]_i)) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (25)$$

dove:

<p>G_i: Portata del fluido per l'edificio i-esimo [kg/s]</p> <p>$T_{tank-ed_i}$: Temperatura dell'accumulo interno all'edificio i-esimo [°C]</p> <p>ζ: Efficienza dello scambiatore di calore</p>	<p>T_{in-ed_i}: Temperatura del fluido in ingresso all'edificio [°C]</p> <p>C_{pft}: Calore specifico [J/kgK]</p>
--	---

5. Campagna di simulazioni ed analisi dei risultati

5.1. Schematizzazione della rete rappresentativa di un caso reale

L'architettura e la topologia della rete presa in considerazione per la modellizzazione, è stata ipotizzata strutturata come segue:

1. un numero di punti di generazione dell'energia termica pari a due, in modo da verificare il funzionamento della rete in una generazione termica distribuita.
2. un numero di edifici da servire pari a due, per tener conto delle possibili diverse richieste di fornitura termica.

Infine si è ipotizzato che la potenza fornita dal generatore termico risulti pari al fabbisogno termico degli edifici per il riscaldamento invernale (HEATING). Nella Figura 15 è mostrato uno schema semplificato della rete termica.

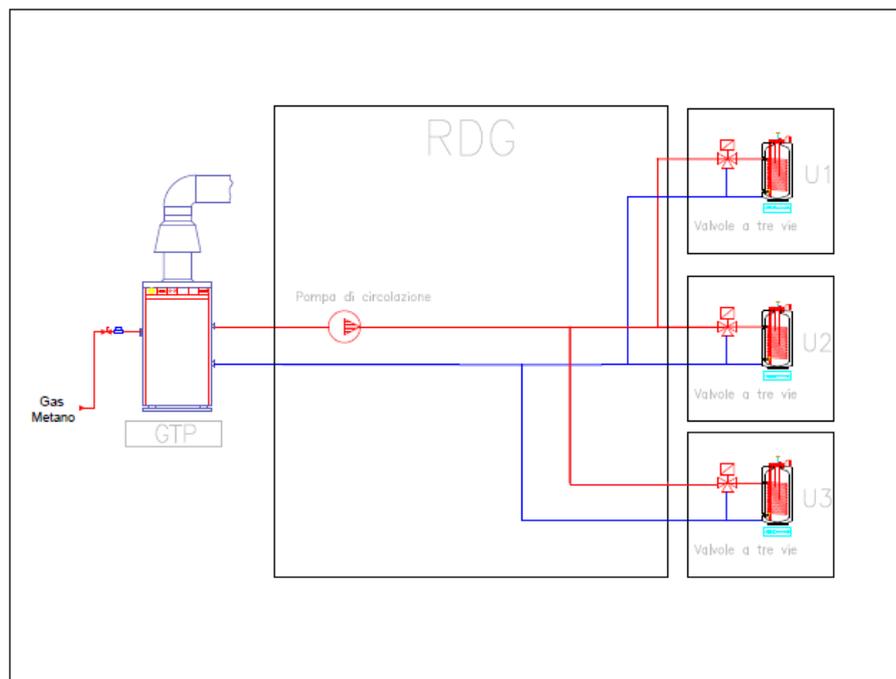


Figura 15 – Layout di rete scelto in base alle ipotesi iniziali

Nella Figura 15, sono presenti i seguenti dispositivi:

- un Gruppo Termico Principale (GTP),
- una Rete di Distribuzione Generale (RDG oggetto della modellazione),
- tre edifici che costituiscono l'utenza (U),
- una valvola a tre vie per ogni edificio presente, in modo che si possa escludere l'edificio dalla fornitura di calore (VTV).

All'interno degli edifici si supporranno presenti degli accumuli e dei gruppi termici secondari che possono fornire calore nelle seguenti eventualità:

- 1) La rete non è in grado di fornire la potenza necessaria in quell'istante
- 2) La rete è fuori servizio

Saranno oggetto di analisi nelle fasi successive, i casi in cui questi generatori termici secondari (GTS) potranno essere costituiti da impianti industriali nei quali sarà possibile recuperare calore refluo dai processi di produzione e parteciperanno alla produzione di calore sulla rete globale, asservendo anche gli altri edifici alle varie richieste di calore.

Le valvole a tre vie presenti all'interno dei vari edifici bypassano il fluido termovettore che transita nella rete nel caso in cui l'edificio non ha bisogno dell'apporto di calore perché il suo accumulo interno si trova già a temperatura.

I tubi che costituiscono la rete sono stati parametrizzati tenendo conto delle tubiere presenti sul mercato per applicazioni riguardanti il teleriscaldamento. In particolare è stata adottata la norma DINEN253 per il calcolo della trasmittanza tenendo conto del raggio interno del tubo, del raggio esterno, del materiale da esso costituito e dell'isolante attorno.

5.2. Integrazione dei modelli di rete sviluppati con ODESSE

Una volta sviluppati i modelli della rete, si è proceduto all'integrazione degli stessi con il modello dell'edificio, e quindi di ODESSE. Quest'ultimo rende possibile, attraverso un algoritmo per la determinazione del carico termico dell'edificio che tiene conto sia delle caratteristiche inerenti all'edificio, sia delle caratteristiche climatiche inerenti la posizione dell'edificio, un'analisi oraria sulla temperatura interna di edificio. Tale modello è rappresentato e spiegato nelle funzionalità di interfaccia esterna dalla Figura 16.

ODESSE	Parametri di interfaccia con la rete
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <div style="text-align: right; margin-bottom: 5px;">temperatura interna ></div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 40%; border-right: 1px solid black; padding-right: 5px;"> > parametri meteo > guadagno persone > guadagno illuminazione > guadagno app elettriche > infiltrazioni > ventilazione kg/h (da convertire in mc/s) > Pest_tot > Tret_in </div> <div style="width: 55%; padding-left: 5px;"> carico elettrico > tout_dis > INV_EST > schedule > Ttank_est > tout_fc > Ttank_inv > pdis_inv > contr_Tank1 > Paux > Tout_rete_G_1 > Pdis > Output_ed1 > </div> </div> </div>	<p>T_rete_in - Temperatura del fluido termovettore in ingresso.</p> <p>T_out_rete - Temperatura del fluido termovettore in uscita</p> <p>Output_ed - Valori di uscita dell'edificio, tra cui:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ la potenza termica richiesta dall'edificio alla rete; ➤ la potenza fornita dal generatore interno ➤ l'energia che l'edificio preleva dalla rete ➤ L'energia che l'edificio preleva dalla generatore interno

Figura 16 – Descrizione dei parametri di interfaccia di ODESSE

A questo punto l'integrazione con i modelli visti nei paragrafi precedenti, avverrà attraverso:

- 1) La potenza richiesta dall'edificio e la temperatura di uscita del fluido termovettore della rete dall'edificio per il modello a scambiatori di calore
- 2) La potenza richiesta dall'edificio per il modello a ripartizione di potenza

Ad entrambi i modelli è stato applicato un generatore di potenza termica che simula il generatore termico principale posto ad una certa distanza dall'edificio. In Figura 17 sono rappresentati i parametri con il quale il generatore si interfaccia alla rete.

Generatore Termico Principale	Parametri di interfaccia con la rete
	<p>Q_aux: Potenza effettiva fornita dal generatore termico alla rete</p> <p>T_out_port_edificio1: Temperatura del fluido termovettore di rete di ritorno dall'edificio</p> <p>T_rete: Temperatura media di rete</p>

Figura 17 – Ingressi ed uscite del generatore di potenza termica

Una rappresentazione d'insieme del modello globale, con un'integrazione di tutto ciò che è stato implementato, e quindi:

1. Edificio (ODESSE)
2. Rete termica
3. Generatore termico

è mostrata in Figura 18, ed in Tabella 3 sono illustrate i parametri di collegamento tra i vari blocchi presenti nel modello.

Blocco	Descrizione	Variabili ingresso	Variabili Uscita
Edificio1	Rappresenta il modello ODESSE e quindi simula il carico termico e l'andamento della temperatura interna dell'edificio in base: <ul style="list-style-type: none"> ➤ alla zona climatica ➤ alla struttura dell'edificio ➤ Ai profili di utilizzo e di occupazione. 	<p><i>Trete_in</i>: Temperatura ingresso fluido termovettore proveniente dalla rete.</p> <p><i>T_tank_inv</i>: Temperatura media dell'accumulo interno all'edificio</p>	<p><i>T_out_rete_G1</i>: Temperatura uscita del fluido termovettore dall'edificio e reimmesso in rete.</p> <p><i>Temperatura interna</i>: esprime la temperatura interna all'edificio</p> <p><i>Paux</i>: Potenza richiesta dall'edificio</p>
Rete Globale	Simula il comportamento della rete	<p><i>Qtot_req</i>: somma delle potenze richieste dagli edifici e della potenza persa sulla rete</p> <p><i>Qaux1</i>: potenza fornita dal generatore termico alla rete, valutando la rete come un accumulo</p>	<p><i>T_in_ed1</i>: Temperatura di ingresso all'edificio 1</p> <p><i>T_in_ed2</i>: Temperatura di ingresso all'edificio 2</p> <p><i>T_tank_eq</i>: Temperatura media di rete, valutando la rete come un accumulo</p> <p><i>Q_loss_tot</i>: Perdita di potenza dovuta al trasporto del fluido termovettore sulla rete</p>
Generatore Termico	Simula il generatore termico ed eventualmente si aziona la parzializzazione di potenza fornita in base al carico.	<p><i>T_target</i>: Temperatura media di rete</p> <p><i>Qtot</i>: potenza totale richiesta alla rete</p>	<p><i>Qaux</i>: potenza fornita dal generatore termico alla rete, valutando la rete come un accumulo</p> <p><i>T0rete</i>: Temperatura di uscita del fluido termovettore dal generatore termico</p>

Tabella 3 – Descrizione dei segnali di ingresso ed uscita nei differenti macroblocchi

Al modello è stata implementata una logica di funzionamento al fine di poter valutare quando accendere il generatore termico principale e portare in temperatura la rete, in modo che gli edifici ad essa connessi possa prelevare le quantità di potenza necessarie al fine di poter distribuire calore al loro interno, ed aumentare di conseguenza la temperatura interna al livello desiderato. Tale logica è mostrata in Figura 19.

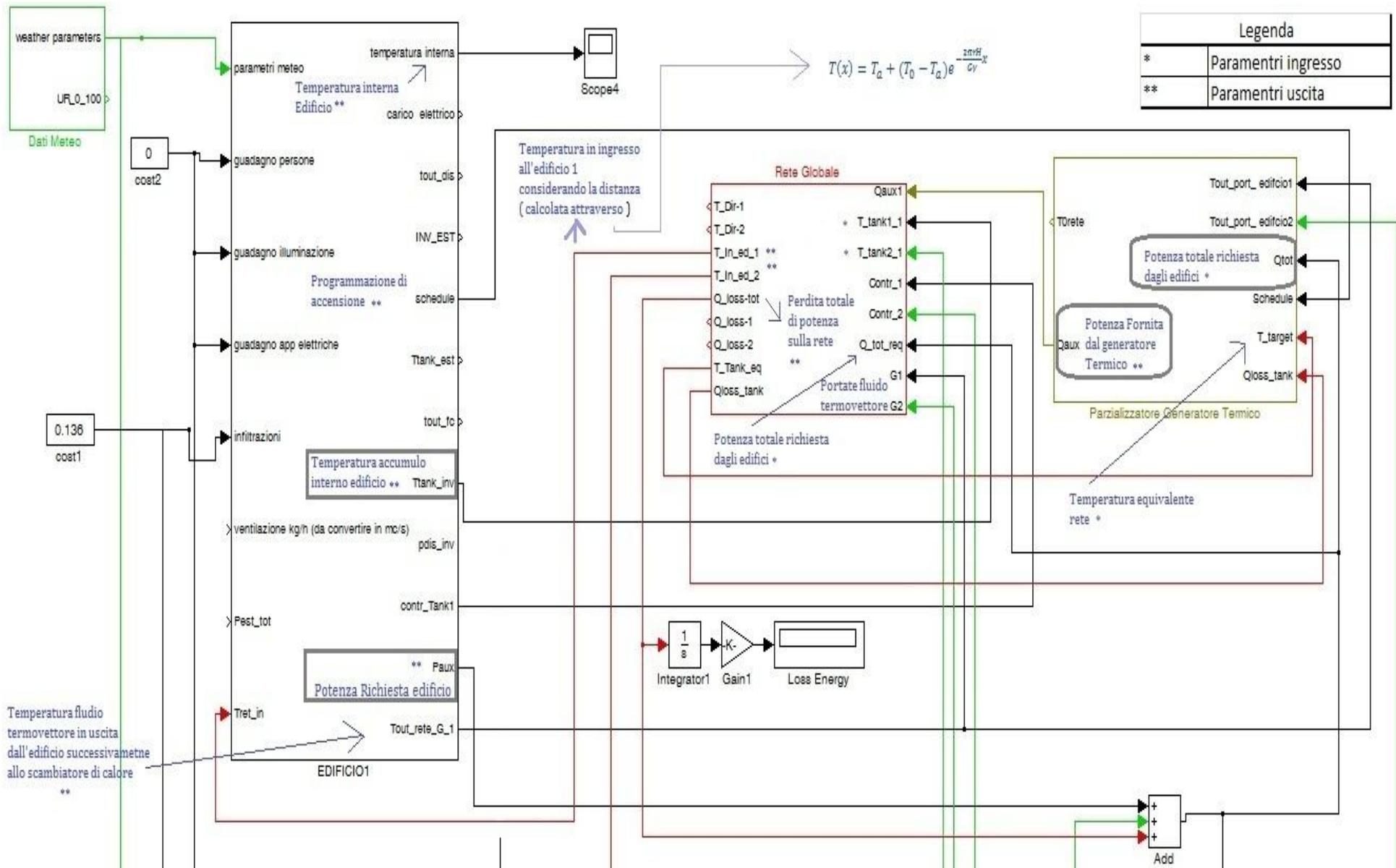


Figura 18 – Schema dettagliato del modello globale in simulink

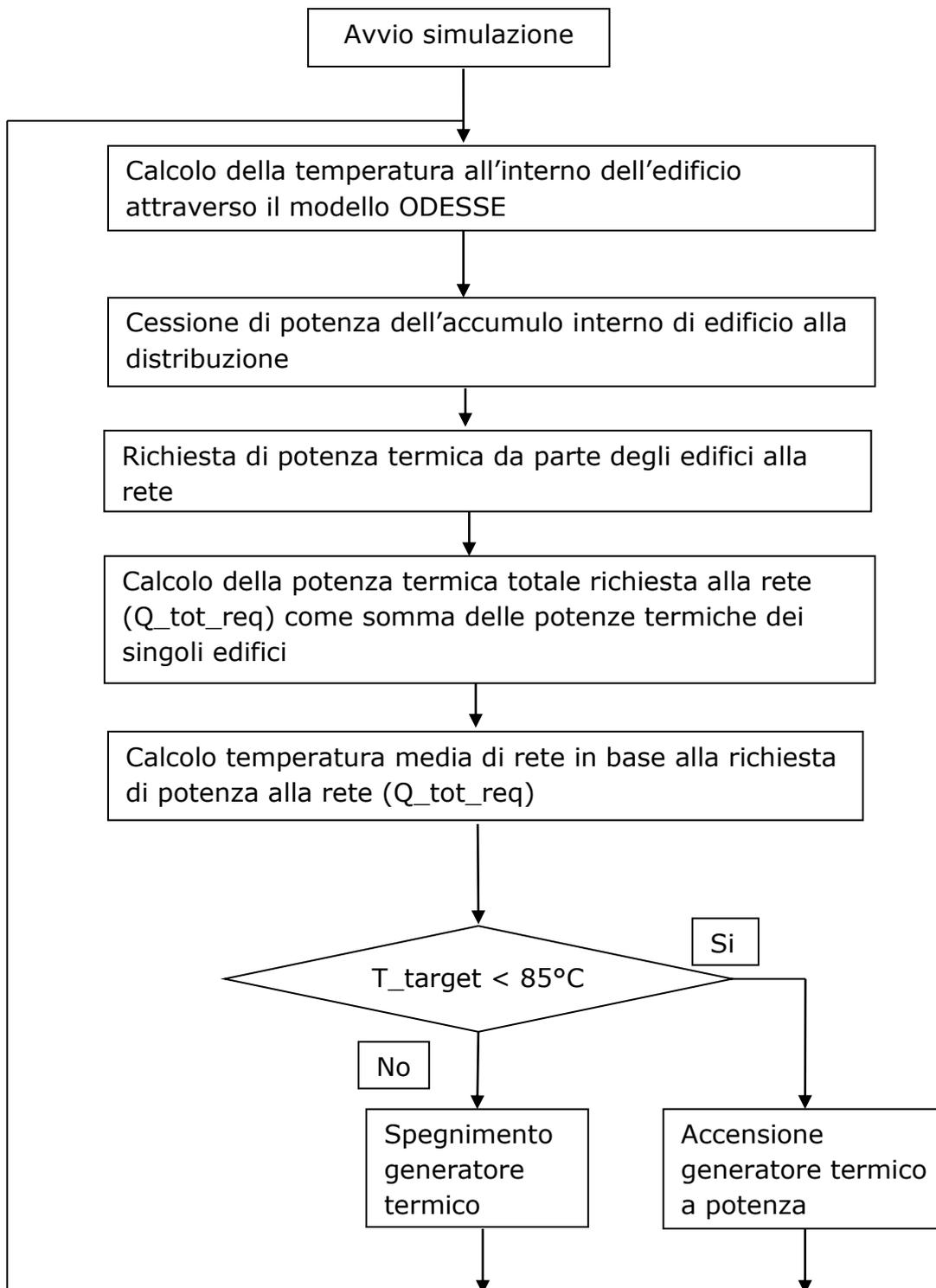


Figura 19 – Diagramma di flusso che descrive la simulazione

5.3. Simulazioni ed analisi dei risultati di una rete per un singolo edificio

Una volta illustrati i singoli blocchi, il modello simulink integrato con edificio, rete e generatore termico principale è rappresentato in Figura 20.

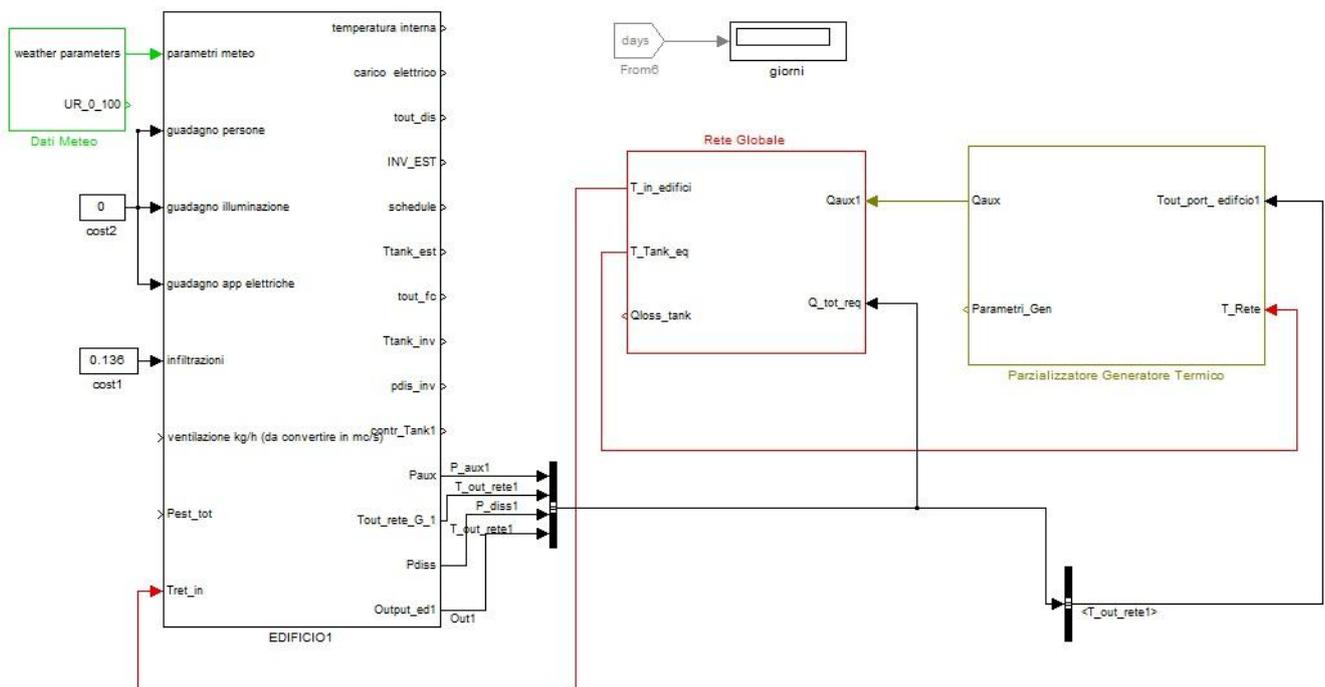


Figura 20 – Schema generatore termico-rete e singolo edificio

In questa prima simulazione, sono stati considerati i seguenti parametri:

- Trasmittanza tubo: $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}^1$
- Raggio tubo: 0,05 metri
- Lunghezza tubo: 400 metri

¹ Tale parametro è calcolato automaticamente dal sistema in base a valori di tubazioni isolanti presenti sul mercato. Infatti, il valore presente, è stato elaborato attraverso le specifiche della TECHNOTHERN, con isolante al ciclopentano presenti in allegato.

- Potenza nominale generatore primario: 45 kW

i parametri di uscita di maggiore interesse che sono stati analizzati, sono:

- 1) Energia termica utilizzata, su base annua, dall'edificio
- 2) Perdita totale di energia termica sulla rete
- 3) Perdita di potenza termica media sulla rete
- 4) Temperatura media del fluido termovettore presente nella rete
- 5) Temperatura del fluido termovettore in ingresso all'edificio
- 6) Temperatura accumulo interno all'edificio
- 7) Temperature ambiente interno agli edifici
- 8) Numero di Reynolds

5.3.1. Simulazioni ed analisi con il modello a scambiatori

Per valutare quali effetti ha prodotto l'introduzione della rete al sistema totale, si è deciso in prima analisi di far lavorare il generatore primario 24 ore su 24 e 7 giorni su 7 nel periodo invernale, come specifica data dal modello di edificio fornito dal gruppo ENEA affiliato. In Figura 21 è mostrato l'andamento della temperatura interna dell'edificio nelle varie ore dell'anno. Come si può notare tale temperatura non scende al di sotto dei 17 °C. In Figura 22, è mostrata la temperatura media della rete termica che si mantiene nel range di temperatura tra gli 80 e i 95 °C. Nell'intervallo di tempo dove la temperatura arriva a toccare anche i 33,5 °C, si sta considerando si sta considerando il periodo primaverile ed estivo, senza l'apporto di qualsiasi apparecchio di raffrescamento. In quell'arco di tempo si è considerato che la temperatura del terreno circostante abbia un valore costante pari a 18 °C.

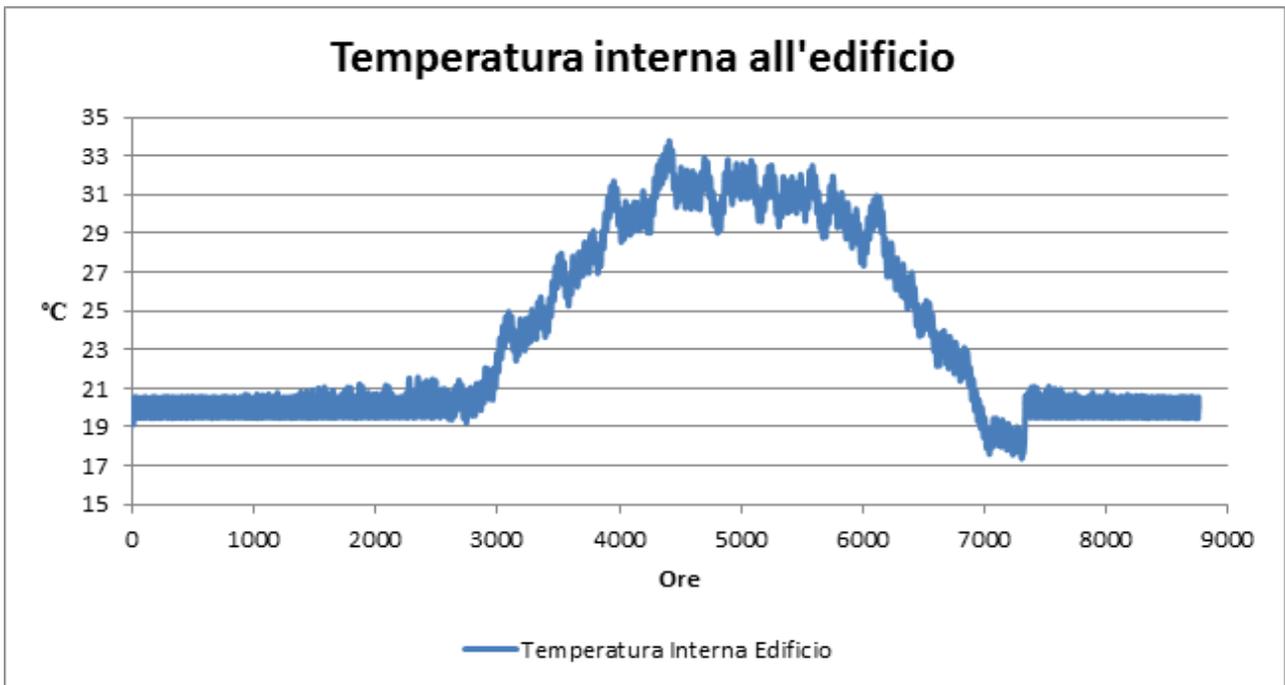


Figura 21 – Andamento della temperatura interna dell'edificio

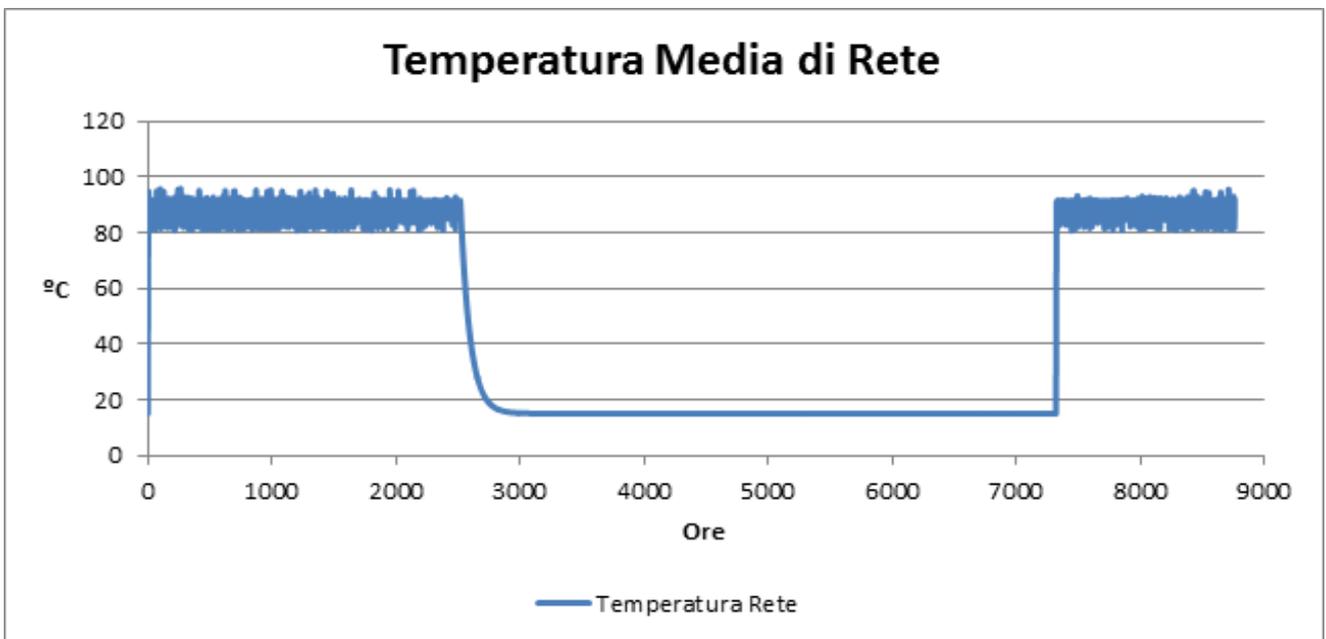


Figura 22 – Temperatura media di rete

In Figura 23 è mostrato l'andamento della temperatura media di rete per un determinato giorno invernale, in modo da verificarne meglio il cambiamento

che questa subisce nelle 24 ore. La potenza dissipata sulla rete per le perdite, considerando le ipotesi descritte precedentemente, è mostrata in Figura 24.

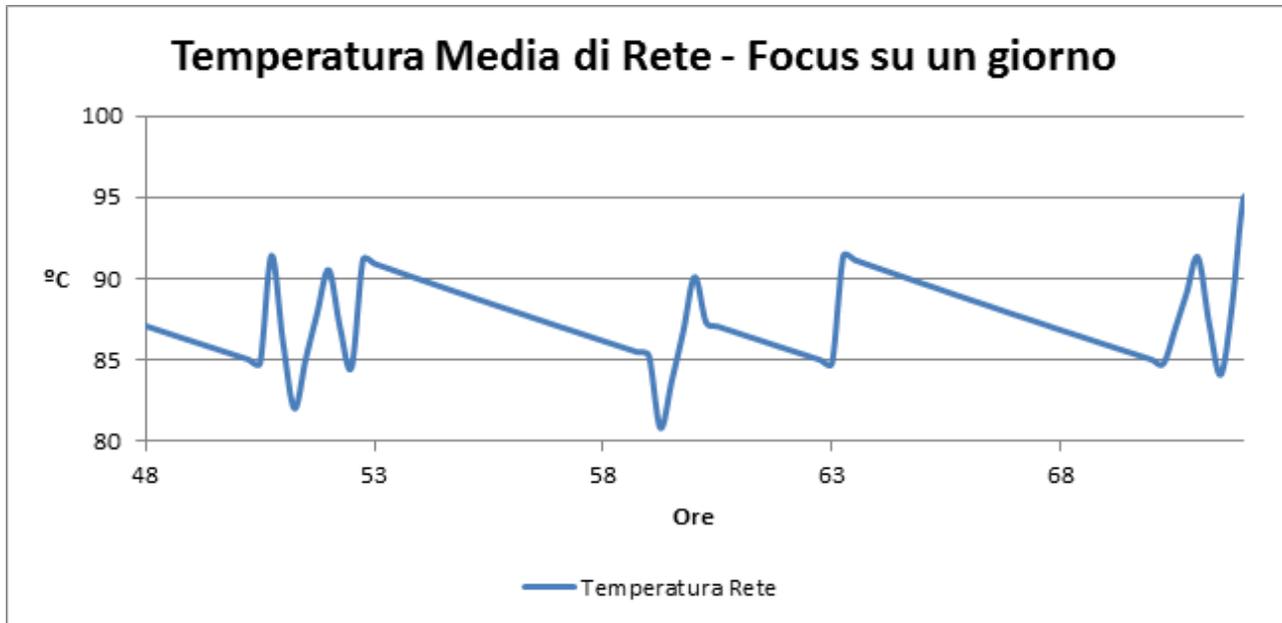


Figura 23 – Andamento della temperatura media di rete in un giorno invernale

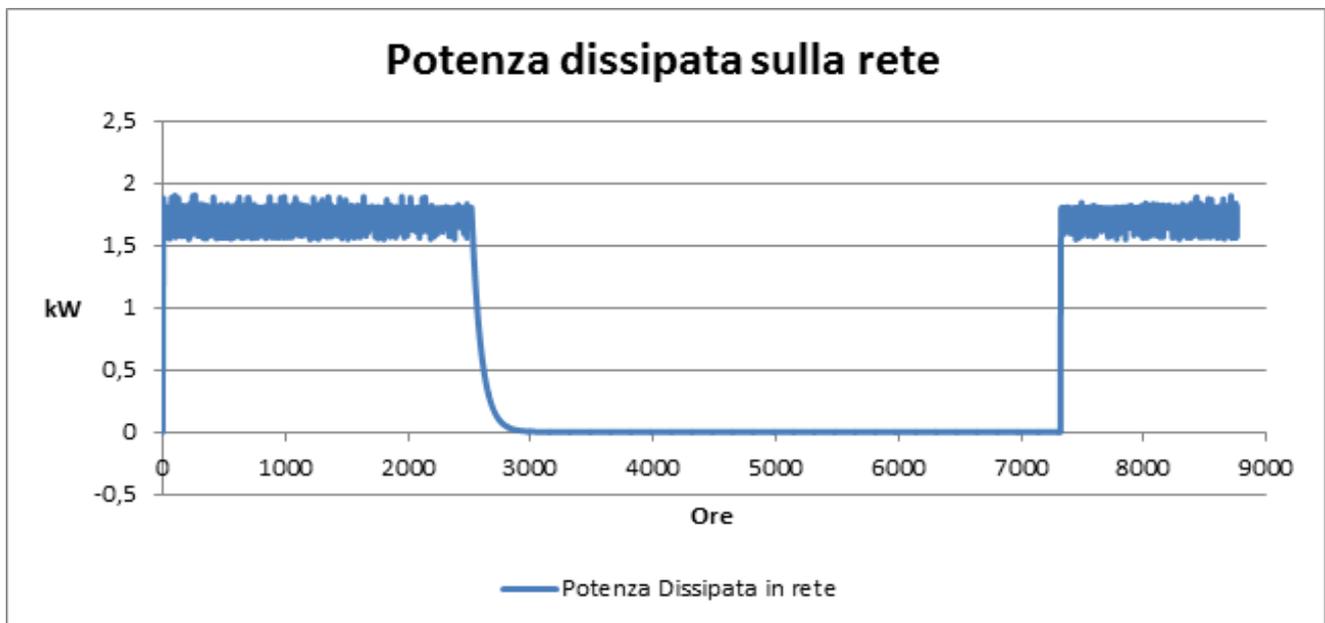


Figura 24 – Potenza dissipata sulla rete

Tale grafico mostra come la potenza media persa dalla rete è di circa 1,7 kW quando in funzione. Anche in questo caso, focalizzando l'andamento della potenza dissipata sulla rete su un giorno invernale, e comparandola con la

potenza che il generatore termico fornisce, si nota come le maggiori perdite di potenza si hanno quando il GTP è in funzione, come mostrato in Figura 25.

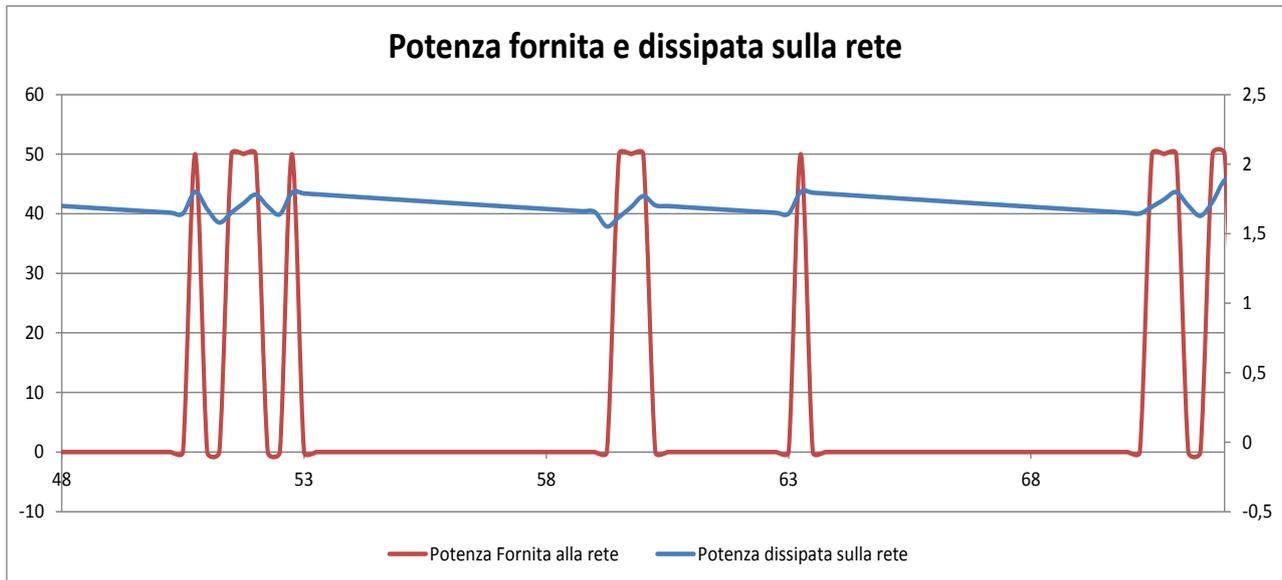


Figura 25 – Potenza del GTP e temperatura media di rete

Il bilancio energetico per questa simulazione è mostrato dalla Figura 26; il risultato è che l'energia termica fornita dal generatore principale, per un 37,8% è dissipata dalle perdite dovute alla rete. Tale valore è così elevato a causa delle prestazioni molto performanti dell'edificio simulato (è di tipo classe A e consuma circa 25 kWh/m² anno) e della potenza di 50 kW nominali del generatore primario.

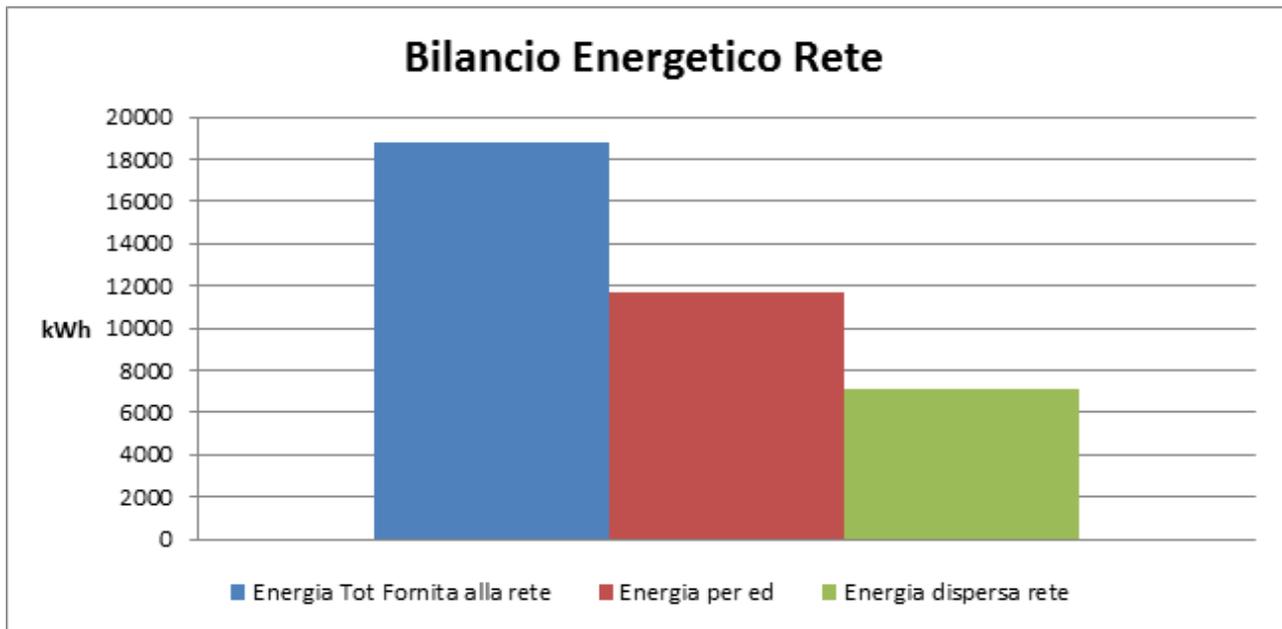


Figura 26 – Bilancio Energetico Totale

I parametri idraulici per tale simulazioni, con le sezioni dei tubi, le lunghezze e le portate corrispondenti, sono calcolati per capirne la fattibilità idraulica:

Reynolds = 20000

Trasmittanza rete= 0,04 W/m² °C

Volume accumulo rete= 1,57 m³

Potenza Pompa circolazione = 15 W

In una seconda simulazione dello stesso modello, si è studiato quanto una variazione del diametro della sezione del tubo, da 0.05 m a 0.1, influenzi il bilancio energetico totale. Infatti, tale variazione apporterebbe un aumento del volume di rete, e quindi un aumento dell'inerzia termica. Il risultato è mostrato in Figura 27, in Figura 29 e in Figura 29. Come si nota, la potenza e l'energia dispersa dalla rete, in questo caso, aumentano di circa il 20%, attestandosi ad una percentuale di circa il 55% dell'energia fornita dal generatore termico principale.



Figura 27 – Potenza dissipata sulla rete

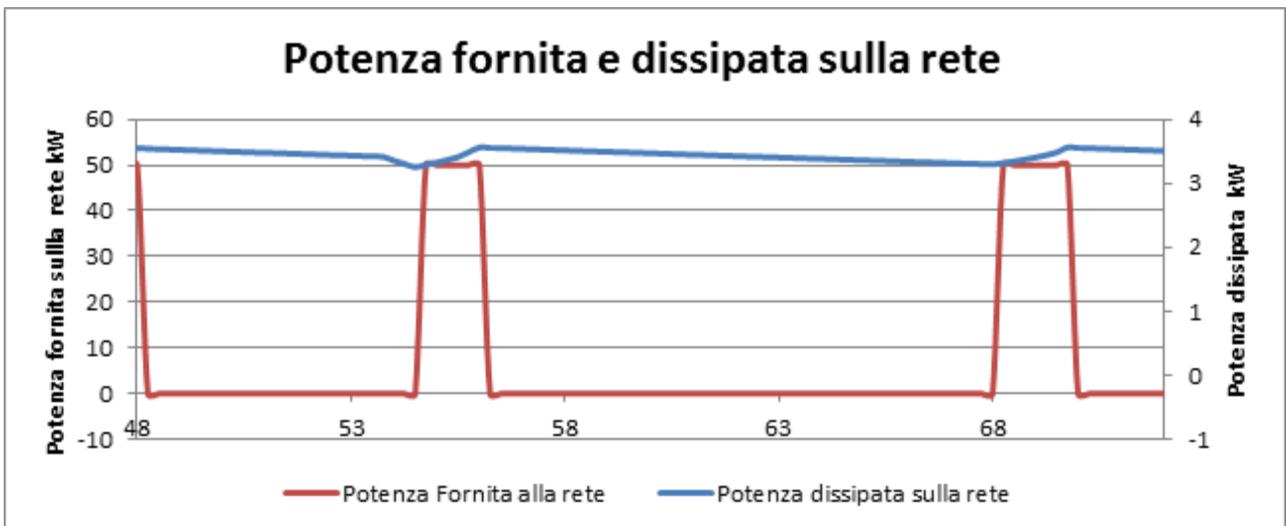


Figura 28 – Potenza del GTP e temperatura media di rete

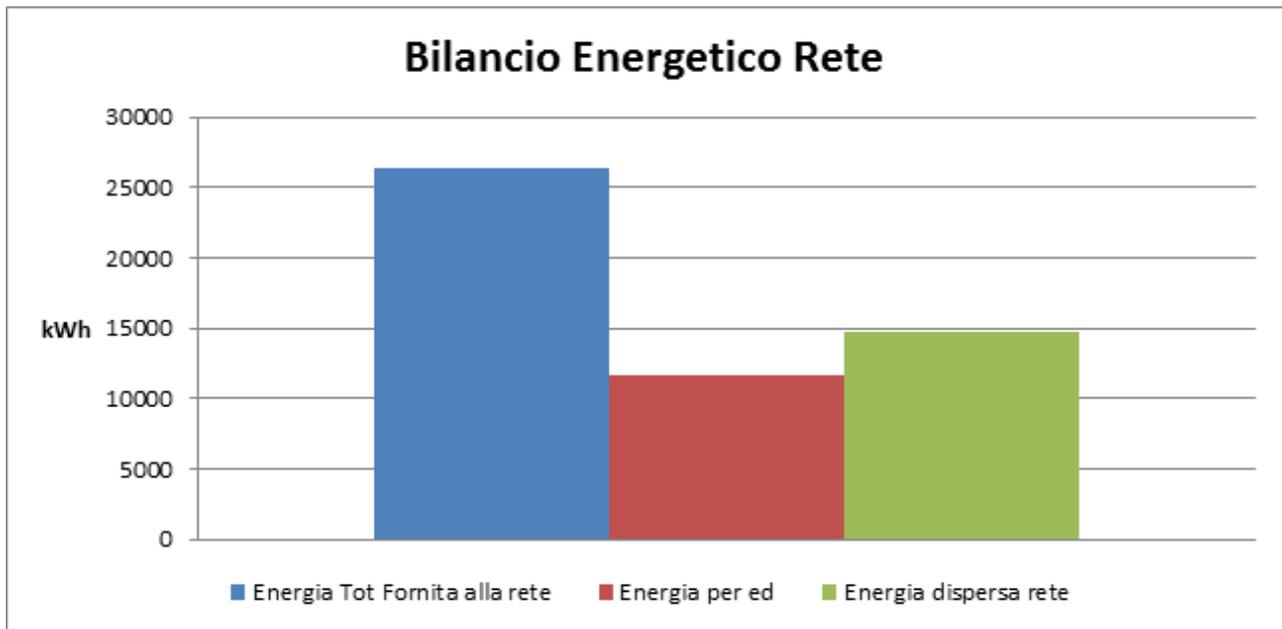


Figura 29 – Bilancio energetico totale

Tale variazione alla sezione ha comportato anche un cambiamento dei rispettivi parametri idraulici, in:

Reynolds = 9923	Trasmittanza rete= 0,04 W/m ² °C
Volume accumulo rete= 6,28 m ³	Potenza Pompa circolazione = 5 W

5.3.2. Simulazioni ed analisi con il modello a ripartitore di potenza

Considerando lo stesso layout mostrato in Figura 20, si valuterà la prestazione energetica in relazione al modello del ripartitore di potenza, adoperando gli stessi parametri caratteristici della simulazione effettuata attraverso il modello a scambiatori. Quindi l'edificio avrà lo stesso andamento della temperatura interna mostrata in Figura 21. Anche i parametri idraulici saranno gli stessi di quelli calcolati nel precedente paragrafo, adoperando una sezione del tubo di 0,05 m. In Figura 30 è mostrato l'andamento della temperatura di rete al

variare delle ore durante l'anno, mentre in Figura 31 è mostrato l'andamento nelle sole 24 ore, confrontando l'accensione del GTP e la temperatura media di rete.

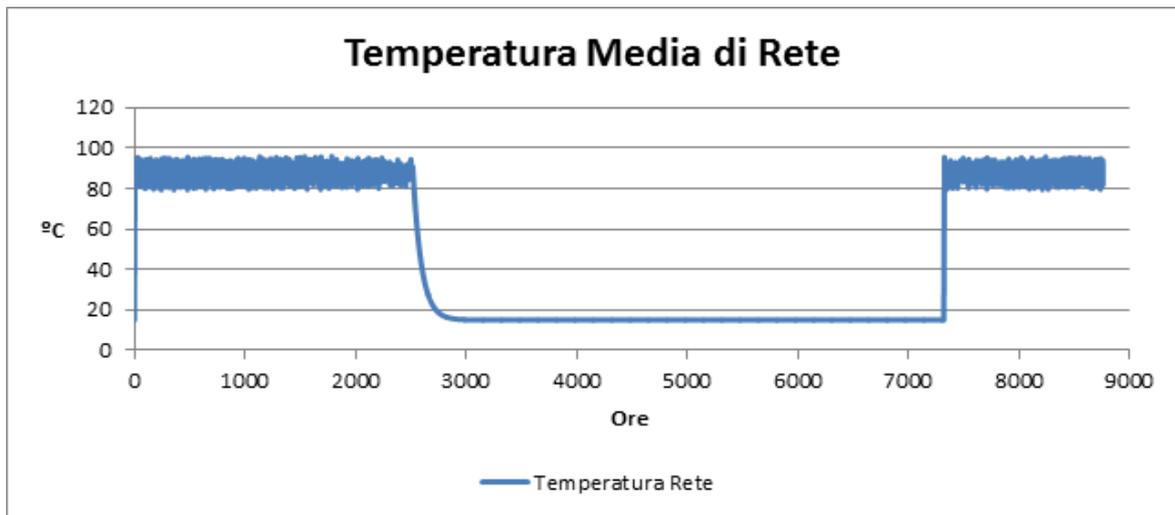


Figura 30 – Temperatura media di rete

Mentre in Figura 32 è mostrato l'andamento della potenza dissipata per le perdite dovute alla rete. Effettuando una comparazione con la Figura 24, si nota in prima istanza un andamento molto simile. Anche in questo modello la potenza media dissipata sulla rete è circa 1,7 kW.

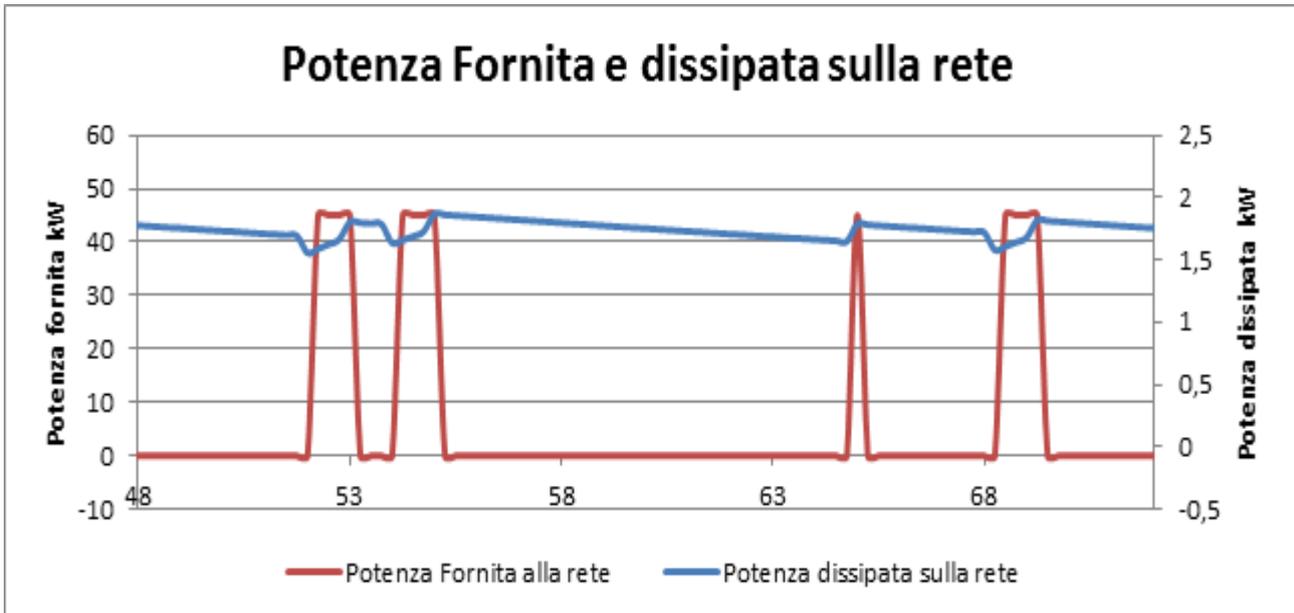


Figura 31 - Potenza del GTP e temperatura media di rete

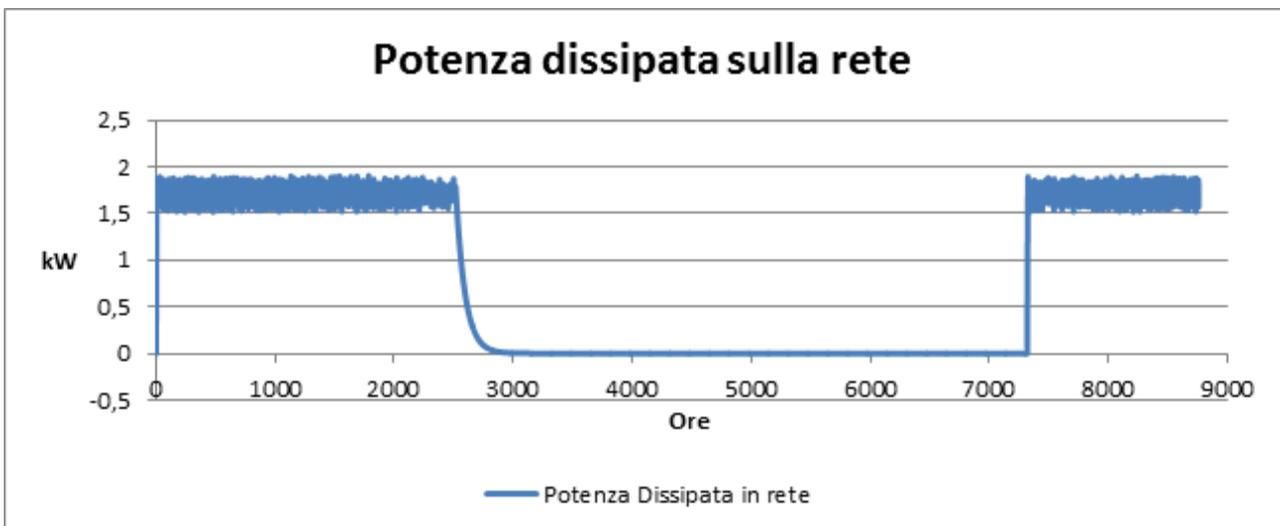


Figura 32 - Potenza dissipata sulla rete

Il bilancio energetico globale è mostrato in Figura 33 e la percentuale di energia dispersa dalla rete in questo caso è pari a 35,5% dell'energia termica totale.

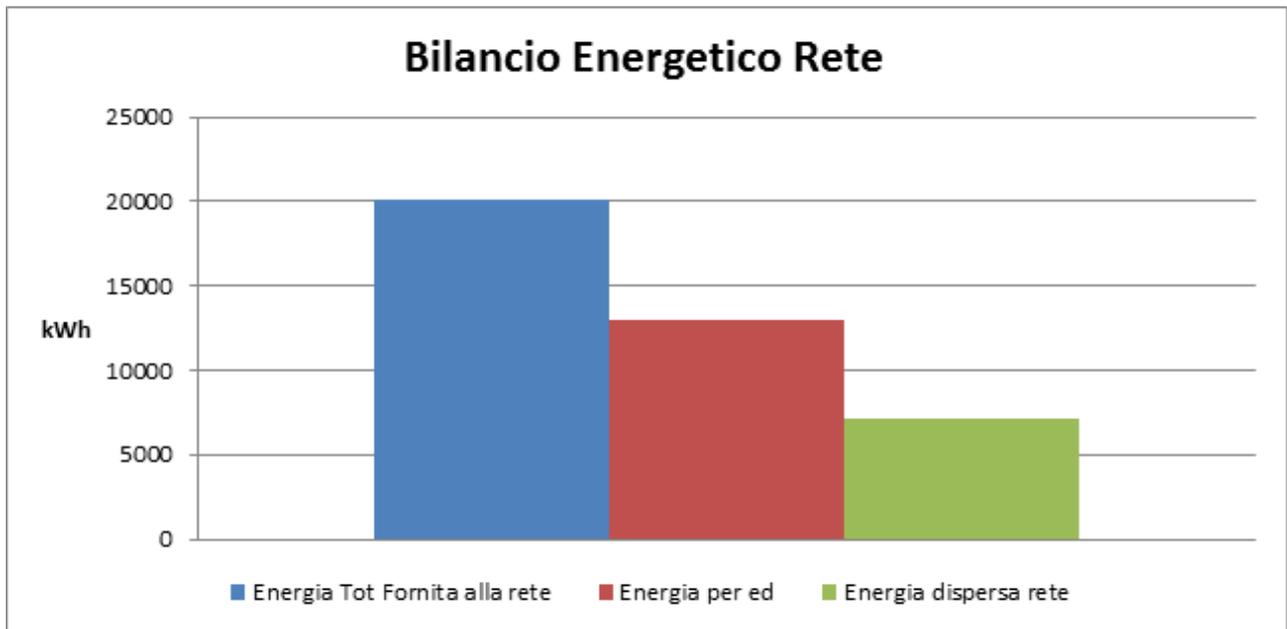


Figura 33 – Bilancio energetico totale della rete

Come si può notare la percentuale di energia termica dispersa sulla rete è quasi la stessa di quella calcolata con la simulazione del modello a scambiatori, differendo del 2,3%. Un'altra differenza fondamentale è l'energia termica che occorre per portare l'edificio in temperatura. Con questo modello, meno accurato del precedente, anche tale differenza risulta circa del 2%.

Analizzando cosa comporti in questo caso e quale influenza abbia sul comportamento della rete un aumento del diametro a 0.1 metri, si calcola attraverso la simulazione, che la percentuale di perdita della rete è pari al 53% dell'energia termica totale necessaria a portare l'edificio in temperatura. Gli andamenti della potenza dissipata sulla rete ed il bilancio energetico sono mostrati in Figura 34 e Figura 35.



Figura 34 - Potenza dissipata sulla rete durante l'anno

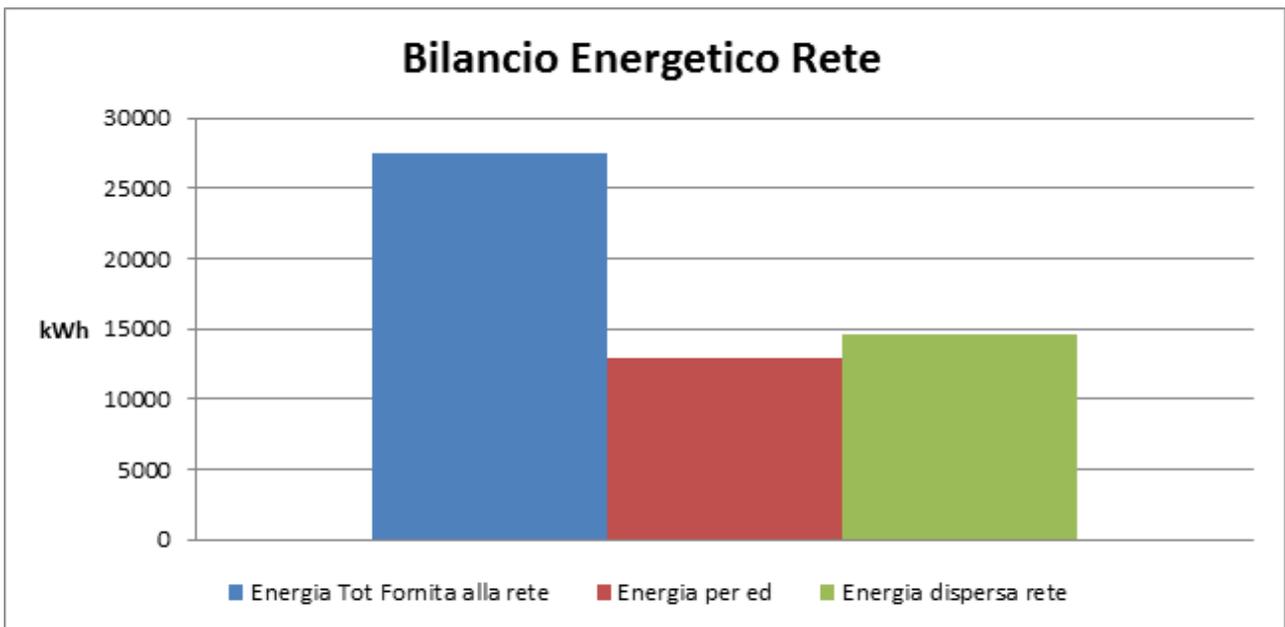


Figura 35 - Bilancio energetico totale

Anche in questo caso è interessante notare quanto e come aumenti la perdita di potenza sulla rete in corrispondenza dell'accensione del GTP, come illustrato dalla Figura 36.

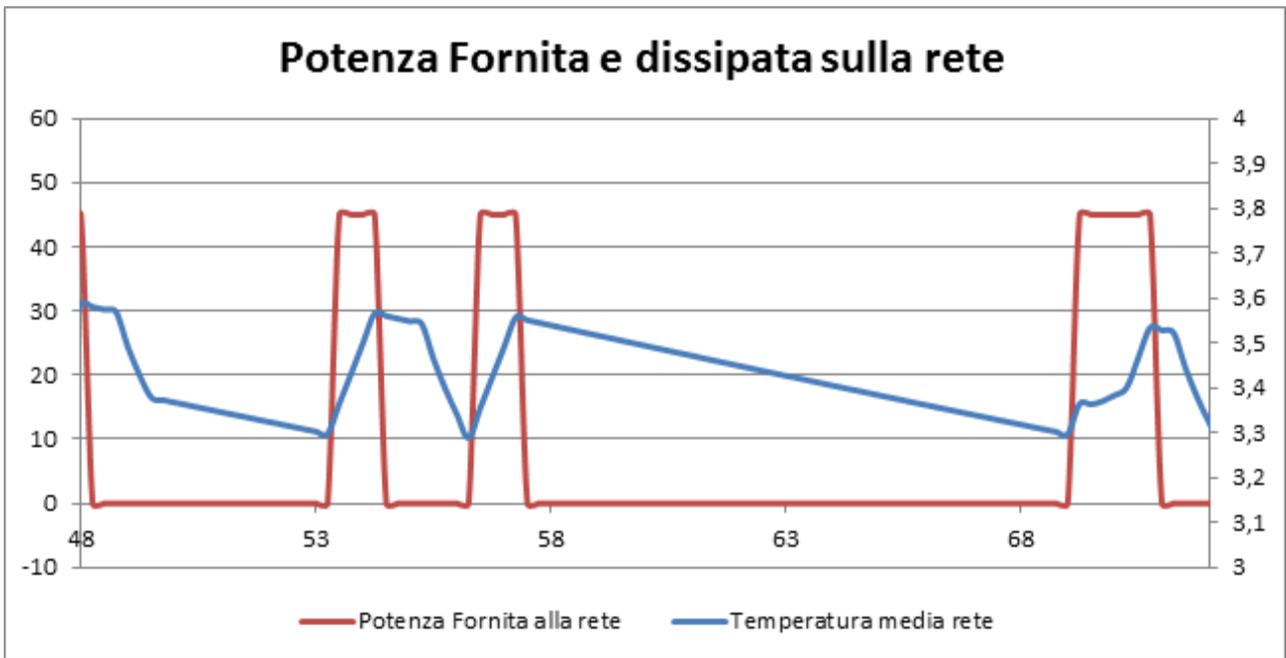


Figura 36 - Potenza del GTP e temperatura media di rete

5.4. Simulazioni per valutare la necessità di georeferenziazione

Al fine di poter analizzare più edifici, posti a differenti distanze, è stato studiato se considerare una distanza media a cui poter pensare collegati tutti gli edifici, oppure dover inserire puntualmente le differenti distanze struttura per struttura. La Tabella 4 esprime i vantaggi e gli svantaggi che si avrebbero ricorrendo ad una modellizzazione piuttosto che ad un'altra.

Metodologia	Vantaggi	Svantaggi
Lunghezza equivalente	Semplice implementazione; elevata scalabilità	Maggiorazione dell'errore sul calcolo totale
Lunghezza puntuale	Analisi più precisa	Difficile implementazione; modesta scalabilità

Tabella 4 – Vantaggi e svantaggi dei modelli preposti

Per valutare quanto sia affidabile il metodo della lunghezza equivalente, si è valutato un modello dove siano presenti due edifici perfettamente uguali e si è avviata una simulazione per capirne il consumo energetico totale, confrontandolo con il consumo energetico che lo stesso modello avrebbe portato adoperando un'analisi puntuale, e dove sono state valutate le singole distanze dagli edifici. Il primo edificio dista un totale di 150 m dal generatore termico principale, mentre il secondo dista 350 m. Tale simulazione è stata effettuata considerando una potenza di generazione pari a 20 kW. Come anticipato precedentemente, gli edifici sono stati strutturati e studiati in modo da essere energeticamente performanti.

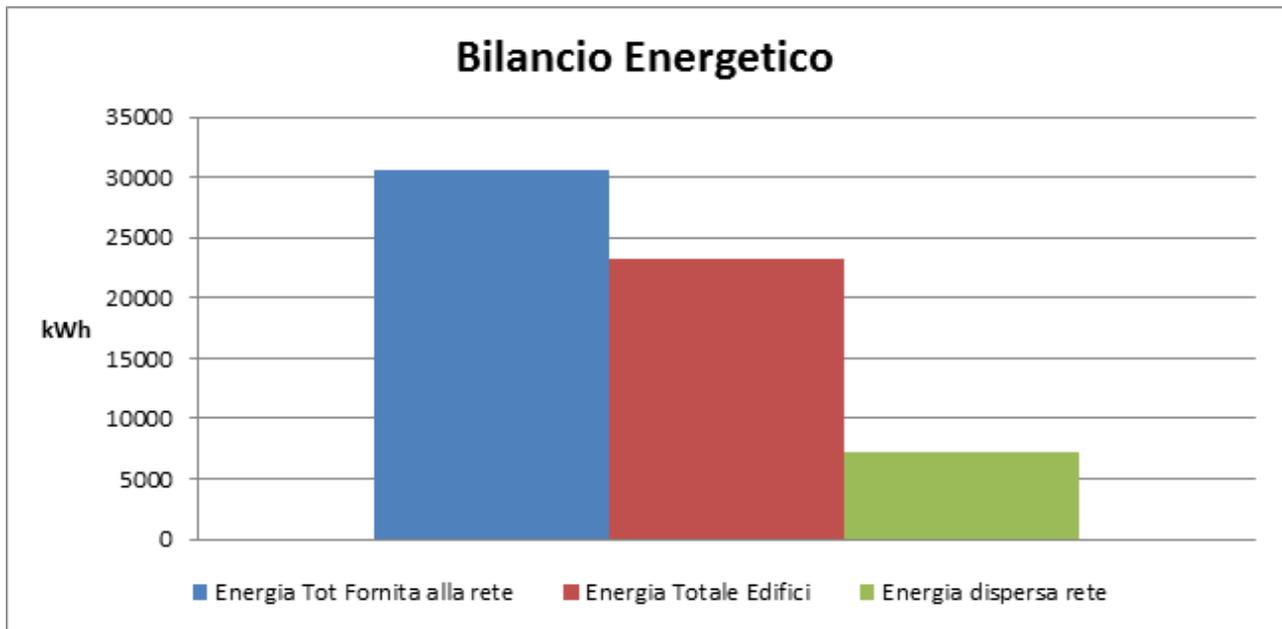


Figura 37 – Bilancio energetico considerando lunghezze fisiche

Con un'energia dispersa sulla rete pari a 7279 kWh e risulta essere pari al 23,8% dell'energia termica fornita dal generatore termico alla rete, come mostrato in Figura 37.

La stessa simulazione è stata effettuata considerando una lunghezza equivalente paria alla media delle due lunghezze di diramazione; quindi è stata considerata una lunghezza equivalente di 250 metri. L'energia persa sulla rete è pari a 7089 kWh e risulta pari al 23,3% dell'energia termica totale.

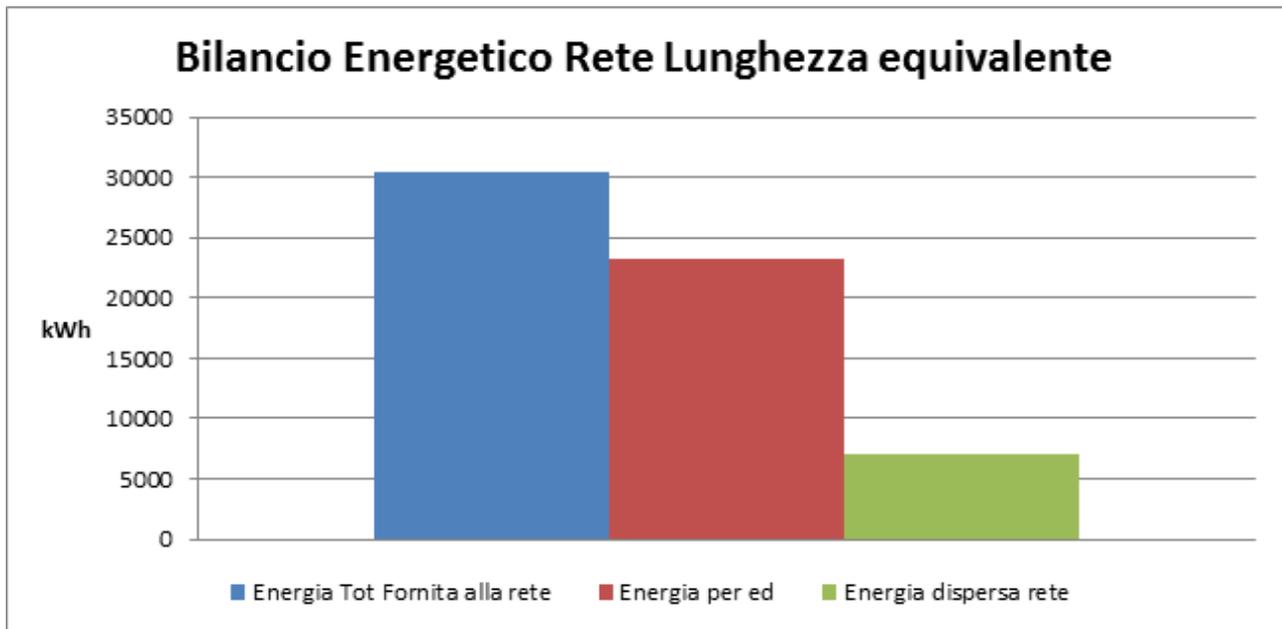


Figura 38- Bilancio energetico considerando una singola lunghezza equivalente

Come si nota dai grafici la differenza non risulta eccessiva, ma questo accade perché sono stati considerati edifici identici. All'aumentare della richiesta termica e quindi della struttura e dei consumi energetici di ogni edificio, tale differenza risulterebbe troppo elevata e quindi si è deciso di implementare un modello che faccia riferimento ad una struttura topologica in cui ci siano le lunghezze fisiche per simulare in modo migliore la realtà.

5.5. Simulazioni ed analisi del modello rete complesso con scambiatori

Si analizzi ora come operi la rete e quale influenza essa abbia con un numero di edifici maggiore di quello finora considerato. In base a considerazioni precedenti, si prenderà come riferimento lo schema illustrato in Figura 15. Il layout specifico scelto in modo da avere un'estensione ed un'influenza della rete non trascurabile, è mostrato Figura 39. Questo in base al fatto che si sono considerati tre edifici identici, in modo da concentrare l'attenzione sulle proprietà e sugli effetti che della sola rete quando si valuta una struttura complessa.

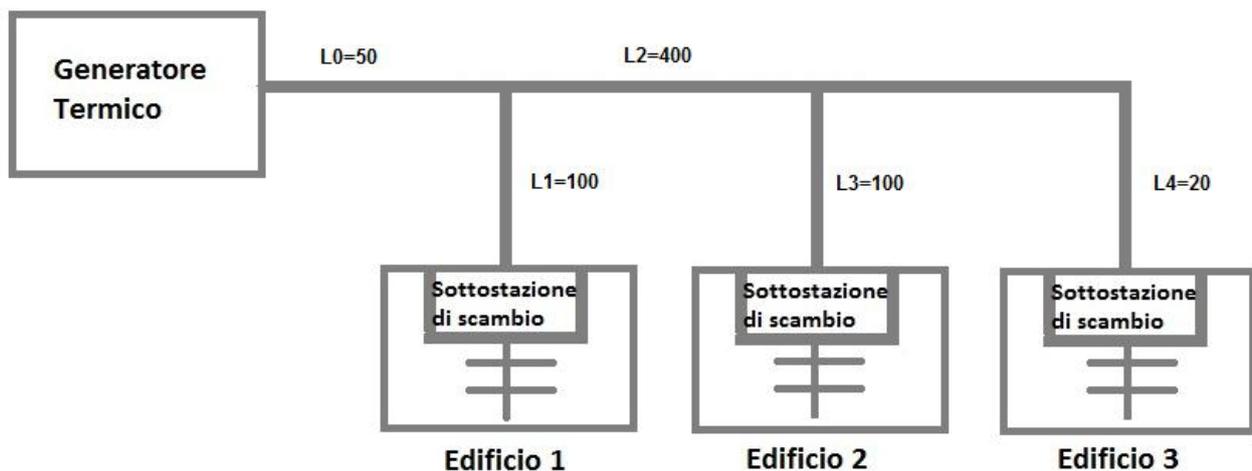


Figura 39 – Layout rete simulata

Le simulazioni sull'intero anno mostrano che, con un generatore termico principale da 55 kW nominali è possibile mantenere in temperatura tutti gli edifici presenti. Questo accade principalmente perché i picchi di potenza sono coperti dall'accumulo interno di 1 m³ presente in ognuno di essi, e dalla rete stessa che, come visto nei paragrafi precedenti, funge da accumulo. Come si può notare dalla Figura 40, le temperature dei tre edifici hanno lo stesso andamento al variare del tempo, ed in inverno si attestano ad una temperatura

media di 20°C. La temperatura media del fluido termovettore all'interno della rete è intorno agli 80 °C (Figura 42). La potenza media dissipata sulla rete è pari a circa 2,7 kW, circa il 15 % della potenza totale fornita dal generatore termico principale (Figura 43). Nel bilancio energetico totale si nota come l'energia dispersa sulla rete è pari a circa il 24,5% dell'energia termica totale fornita dal generatore termico principale.

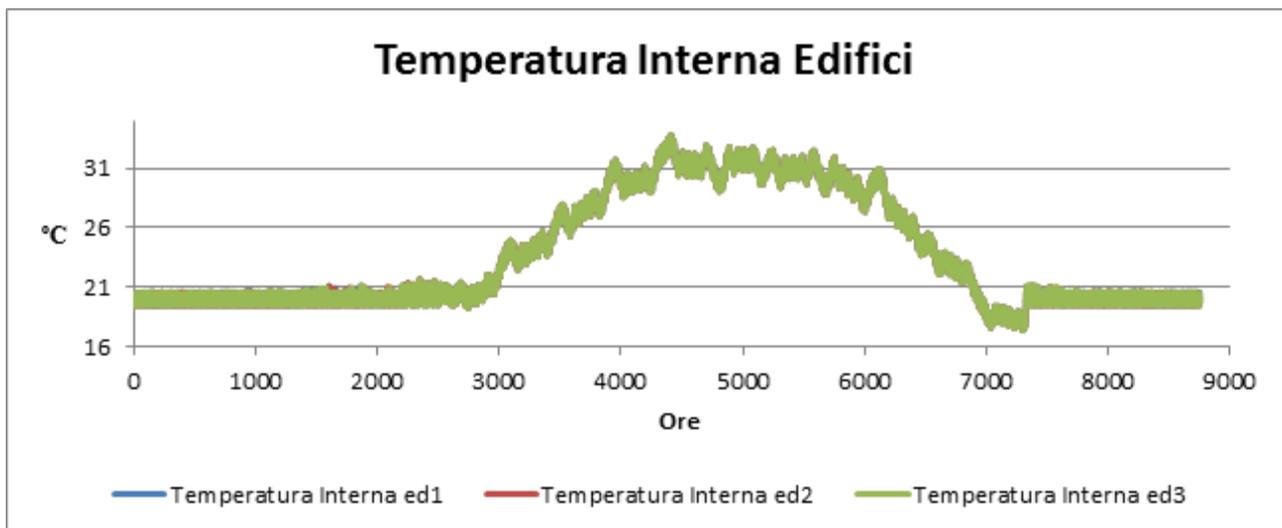


Figura 40 – Temperature interne degli edifici durante l'anno

Focalizzando l'attenzione sull'andamento della temperatura durante un giorno invernale, si ha l'andamento mostrato in Figura 41. Come si nota, essendo gli edifici identici, si ha soltanto uno sfasamento temporale dovuto alle diverse distanze in cui sono situati gli edifici.

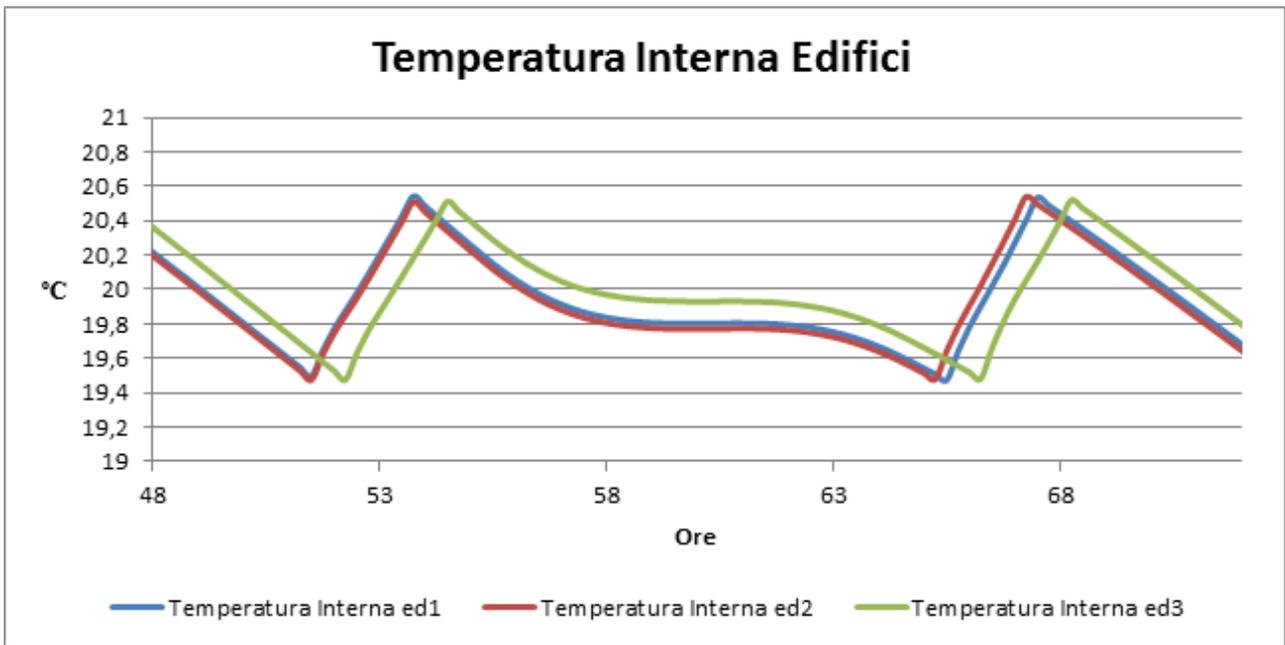


Figura 41 – Andamento della temperatura degli edifici durante un giorno invernale

La temperatura media della rete è mostrata in Figura 42 e come si può verificare, anche in questo caso assume valori nel range di funzionamento tra gli 80 e i 90 °C.

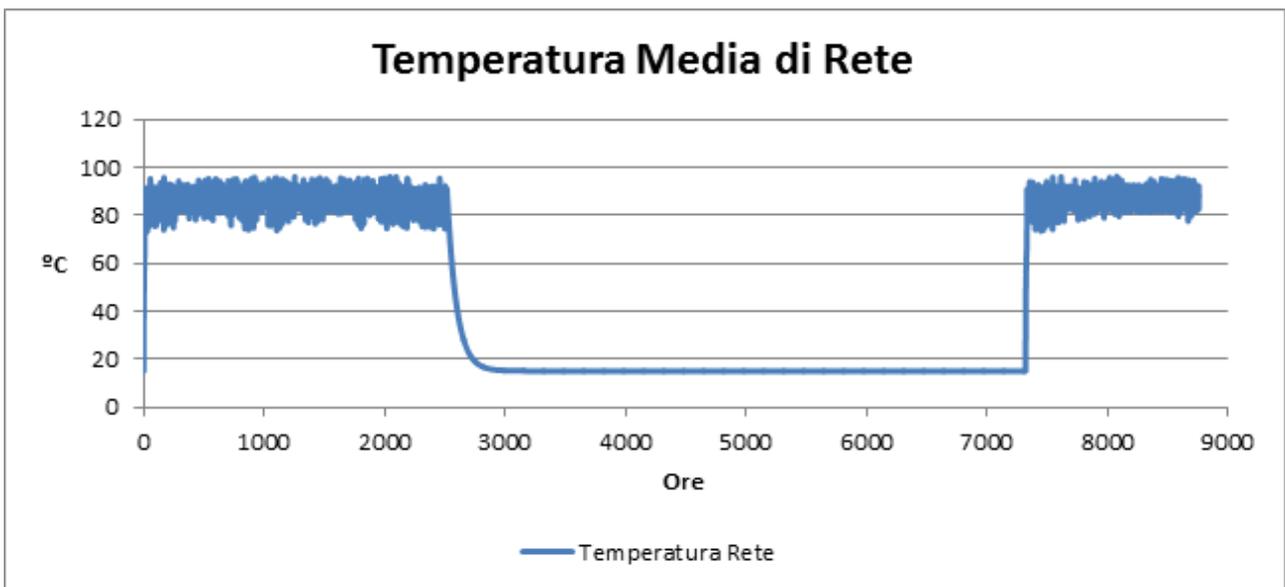


Figura 42 – Temperatura media di rete

La potenza dissipata sulla rete, è mostrata in Figura 43. Questa si attesta nell'intorno di 1,9 kW. Infatti come si può notare dalla Figura 44, dove è mostrato l'andamento della potenza termica fornita dal GTP alla rete e della potenza dissipata sulla rete nell'arco di 24 ore in un tipico giorno invernale.

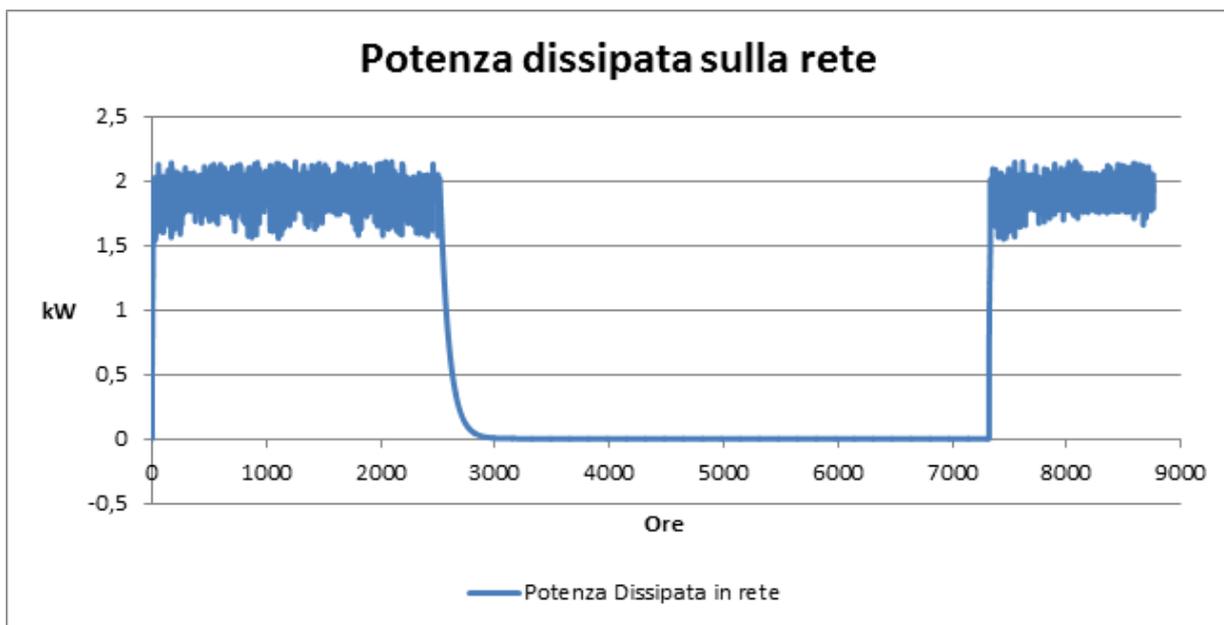


Figura 43 – Potenza dissipata sulla rete termica

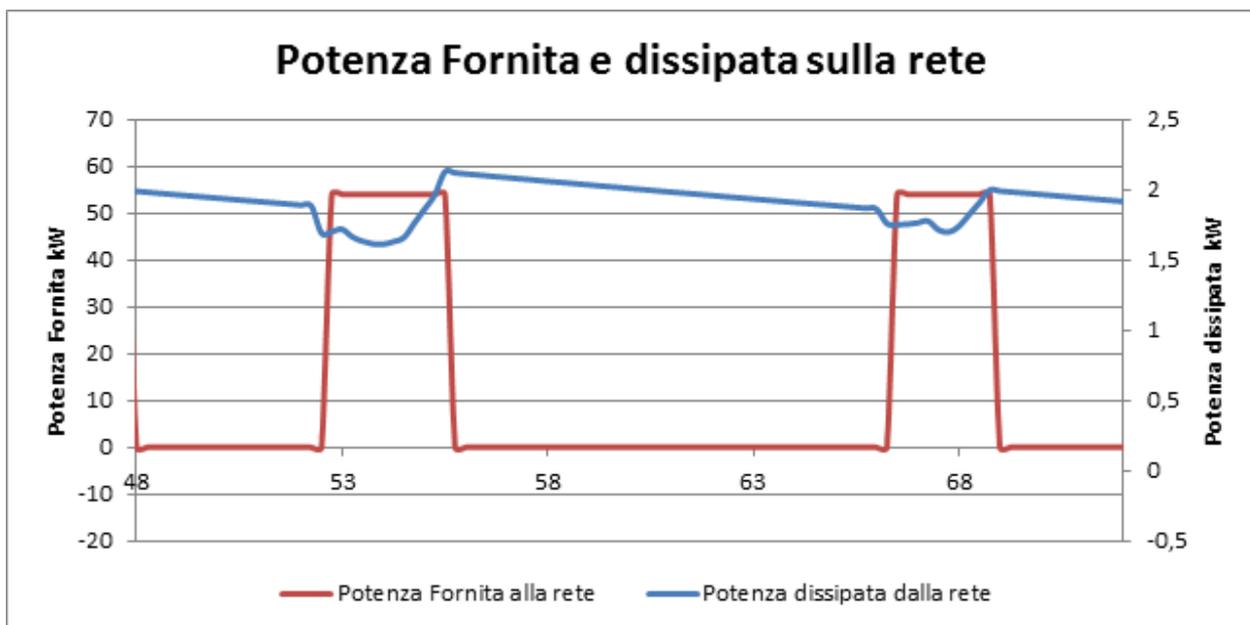


Figura 44 – Potenza fornita e dissipata sulla rete in un tipico giorno invernale

Nel bilancio energetico, il 18,5% dell'energia termica fornita dal GTP è dispersa sulla rete e negli scambiatori di calore interni agli edifici; l'efficienza di questi

ultimi è stata considerata pari al 75% della potenza fornita dalla rete all'edificio. La percentuale di energia dispersa risulta tale sia per la presenza di edifici molto efficienti, sia per l'estensione della rete per soli tre edifici, e sia per il funzionamento nell'arco delle 24 ore del GTP.

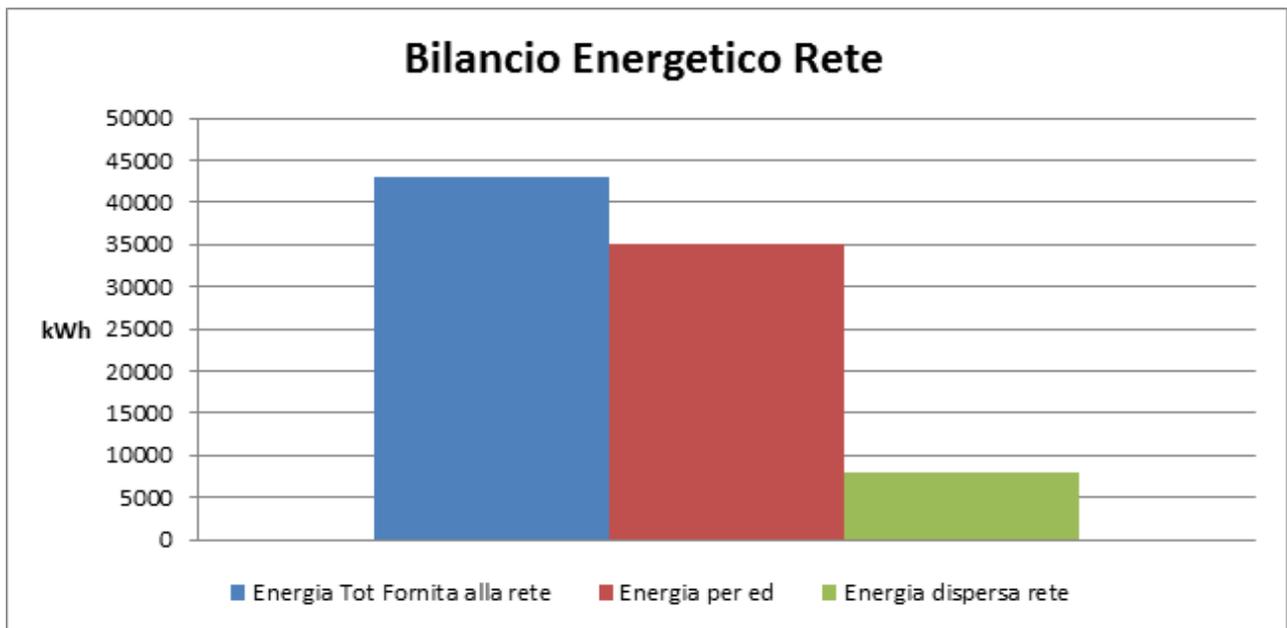


Figura 45 – Bilancio Energetico totale

5.6. Simulazioni ed analisi del modello rete complesso con ripartizione termica

Il layout in presente Figura 39 è stato configurato anche per il modello a ripartizione di potenza, adoperando gli stessi edifici visti nella configurazione precedente. In Figura 46, Figura 47 e Figura 49 sono riportati i diagrammi temporali della temperatura interna degli edifici, che può considerarsi quasi un parametro di ingresso perché è dettato dal carico termico e dalla dispersione degli edifici. Quest'ultimi, sono stati forniti dal gruppo Enea, e per soffermarsi sulle peculiarità della rete è stato effettuato uno studio considerando che il GTP può sempre andare in funzione nel periodo invernale.

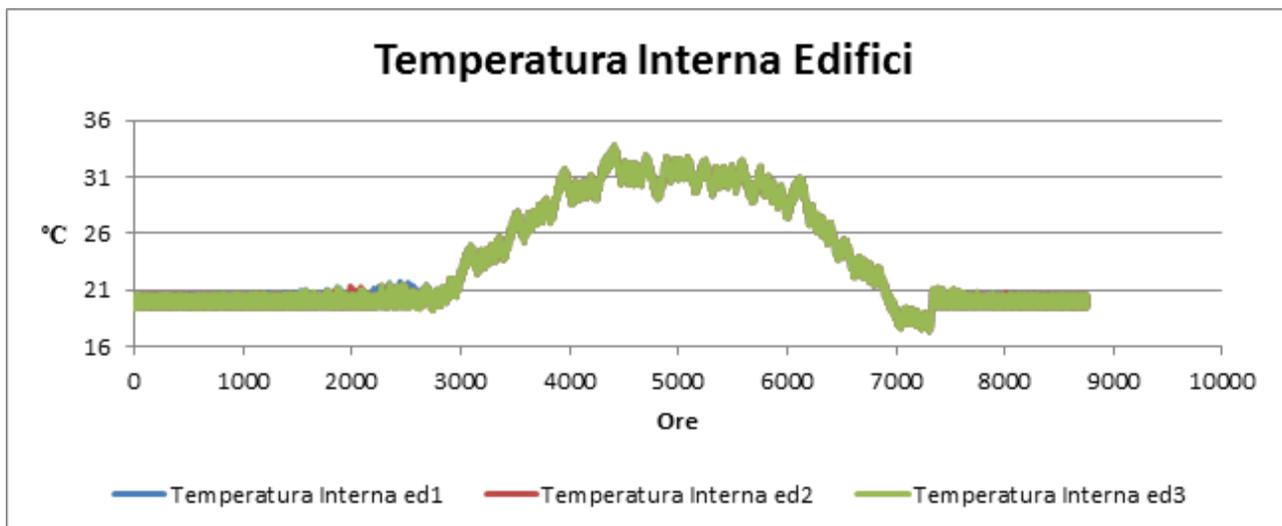


Figura 46 – Temperatura interna edifici

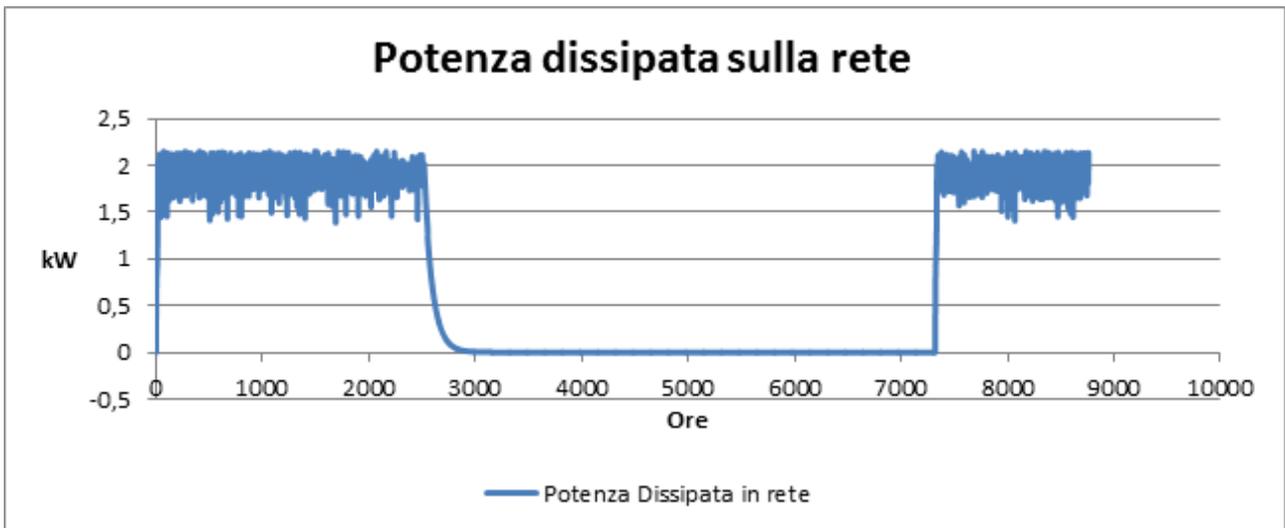


Figura 47 - Potenza dissipata sulla rete

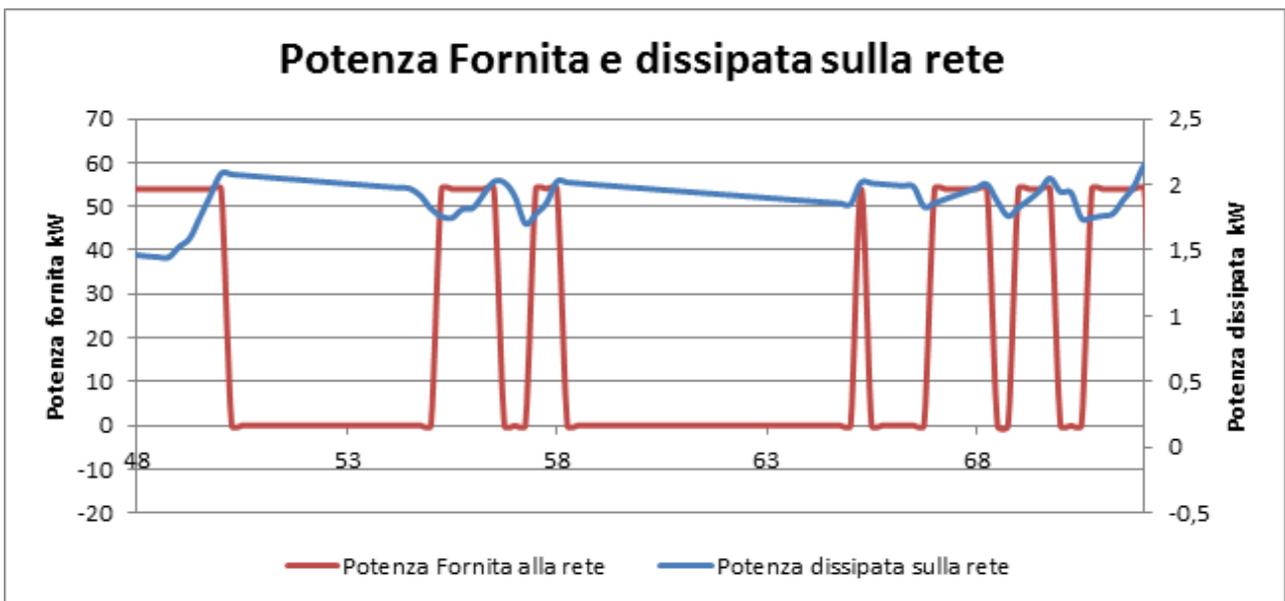


Figura 48 - Potenza fornita dal GTP e dissipata sulla rete

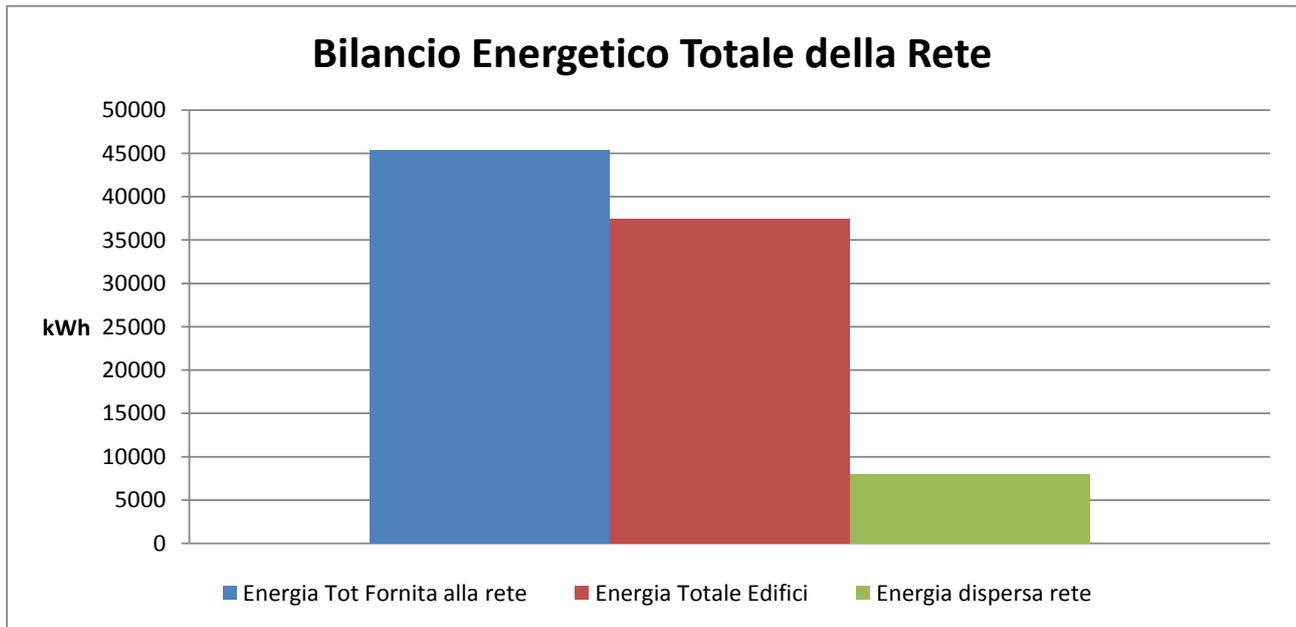


Figura 49 – Bilancio energetico globale

L'energia termica persa per la presenza della rete, in questo caso è pari al 17,5. La differenza rispetto al caso precedente è di circa l'1% sull'energia persa in rete, e di circa il 5% in più rispetto all'energia termica del modello a scambiatori.

6. Conclusioni

Il lavoro svolto per quest'attività ha previsto lo sviluppo e l'implementazione di un modello di rete termica ai fini di calcoli energetici in base alla dispersione di calore che la rete ha per:

- 1) la sua estensione;
- 2) le sue caratteristiche costitutive (sezione interna, sezione esterna, spessore isolante)
- 3) le sue caratteristiche di esercizio (portate, temperature di funzionamento, velocità fluido)

Per tenere conto dell'estensione della rete, è stata studiata e valutata la possibilità di considerare una lunghezza media equivalente che rappresentasse una distanza comune dal GTP a cui poter ipotizzare tutti gli edifici presenti nelle simulazioni. Il risultato che è stato conseguito, porta a concludere che, in prima istanza, sarebbe meglio valutare il modello globale tenendo conto delle differenti lunghezze fisiche, per non incorrere in errori più o meno ingenti, che si accentuano in base sia ai differenti carichi termici che hanno gli edifici, sia ad una diversa logica di gestione dell'edificio. Questo non esclude, comunque, che si possa valutare, come ulteriore sviluppo la ricerca, un parametro che meglio caratterizzi tale spostamento del baricentro dinamicamente.

Il modello della rete è stato implementato come un accumulo termico di volume pari al volume del fluido termovettore contenuto al suo interno. In questo modo è stato possibile tener conto dell'inerzia termica della rete. Lo sviluppo ha previsto due modelli differenti:

- 1) A scambiatori di calore
- 2) A ripartizione di potenza

Il primo è stato realizzato considerando fisicamente ogni singolo scambio termico presente nei vari edifici; in questo modo si è voluto verificare il funzionamento quanto più possibile vicino alla realtà, in modo tale da commettere il minimo errore possibile.

Il secondo modello, quello a ripartizione di potenza, è stato implementato al fine di rendere il modello globale più scalabile, considerando l'obiettivo preposto della rete: quello di simulare il comportamento di un intero quartiere urbano per poter valutare il comportamento e l'interazione tra i vari edifici.

A tal fine è stato verificato il comportamento della rete in relazione alla potenza dissipata su essa e dell'energia totale dispersa considerando un anno di funzionamento con un singolo edificio e con tre edifici posti a differenti distanze dal GTP. E' stato anche studiato quale implicazioni, in termini energetici, avrebbe avuto in termini energetici un aumento della sezione del tubo e quindi dell'inerzia termica della rete. Come si è potuto constatare, aumentando troppo tale valore, si avrebbe una dispersione di calore troppo accentuata e non conveniente dal punto di vista dell'efficienza del sistema. In Figura 50 è mostrata la differenza dei bilanci energetici ottenuti attraverso le simulazioni effettuate per entrambi i modelli nel layout a tre edifici. Le prime due colonne rappresentano l'energia termica totale fornita dal GTP: quella più a sinistra è il valore per il modello a ripartizione di potenza, mentre quella più a destra è il valore di energia termica fornita dal GTP nel modello a scambiatori. Come si nota dalla Figura 50, la maggiore differenza si ha nell'energia ceduta agli edifici. Tale differenza è stata calcolata e vale, per le simulazioni effettuate, circa il 5%. Anche se può sembrare non trascurabile, occorre considerare il fatto che la rete è stata valutata nel peggiore dei casi, e quindi quello di massimo funzionamento durante il periodo invernale. Inoltre è possibile calcolare un fattore correttivo che possa far utilizzare indistintamente i due modelli. Questo perché sebbene converrebbe adoperare sempre il modello a scambiatori, quest'ultimo risulta difficilmente scalabile. Invece, le potenzialità del modello a ripartizione di potenza sono notevoli, e raggiungono

in maniera ingegneristica gli scopi proposti, e quindi quello di inserire la rete in un contesto più complesso in modo da poter simulare il comportamento termico-energetico dell'implementazione della rete in un distretto cittadino più ampio, e capirne i vantaggi economico-ambientali.

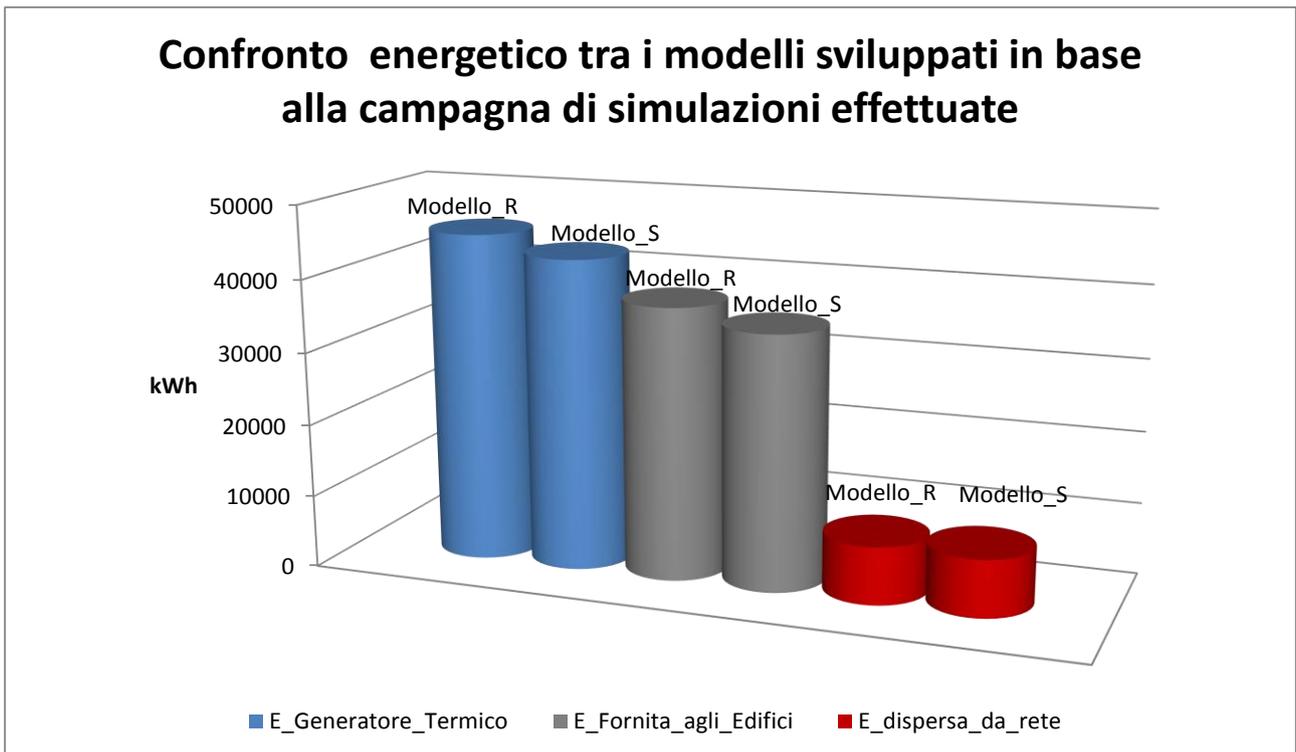


Figura 50 – Confronto tra i modelli sviluppati

7. Bibliografia

1. **AIRU.** Il riscaldamento urbano. *AIRU Periodico*. 2010.
2. **Taddei, Andrea.** *La progettazione di centrali termiche a metano e GPL*. s.l. : Maggioli, 2010.
3. **Bocci Enrico, Caffarelli Alessandro, Villarini Mauro, D'amato Alessio.** *Sistemi a biomasse: progettazione e valutazione economica*. s.l. : Maggioli, 2011.
4. **Gianluca, Ghelli Gianfranco Maria - Ghelli.** *Tecnica delle reti e degli impianti acqua e gas*. s.l. : Maggioli, 2010.
5. **W.F. Hughes, J.A. Brighton.** *Fluidodinamica*. s.l. : Schaum ETAS libri, 1982.
6. **E. Bettanini, P.F. Brunello.** *Lezioni di impianti tecnici*. s.l. : Cleup, 1985.
7. **Cocchi, A.** *Termofisica per Ingegneri*. s.l. : Petroni, 1973.
8. **Felli, Mauro.** *Lezioni di Fisica Tecnica*. Roma : Morlacchi, 1999.

Appendice

Esperienza del gruppo di ricerca

Il Gruppo Universitario in Sistemi Elettrici per l'Energia (GUSEE) del Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università Sapienza di Roma è costituito da 4 professori ordinari: Alfonso Capasso, Regina Lamedica, Carlo Mazzetti, Giuseppe Parise, 1 professore emerito: Iliceto, 3 professori associati: Fabio Gatta, Umberto Grasselli, Massimo Pompili e 3 ricercatori: Maria Carmen Falvo, Stefano Lauria, Luigi Martirano. Attualmente lavorano nel gruppo anche 6 dottorandi di ricerca ed un assegnista di ricerca.

Negli ultimi anni l'unità di ricerca si è occupata in generale delle tematiche relative a:

1) Trasmissione dell'energia elettrica

Metodi e tecnologie innovative per lo sfruttamento ottimale della capacità di trasporto delle reti - Elettrodotti misti linea aerea-cavo di AT e AAT, Affidabilità, sicurezza e vulnerabilità del sistema elettrico - Fulminazione diretta delle linee di trasmissione AAT - individuazione automatica delle manovre correttive per la risoluzione di contingenze severe, Analisi dei sistemi elettrici: pianificazione delle reti di trasmissione in contesto di mercato.

2) Distribuzione dell'energia elettrica

Coordinamento degli isolamenti delle linee in cavo e diagnostica dei guasti nei componenti elettrici, Valutazione del rischio cui sono esposti i sistemi elettrici ed elettronici per effetto delle scariche atmosferiche, Coordinamento degli isolamenti delle linee di distribuzione e delle linee di trazione elettrica sollecitate da tensioni impulsive non convenzionali, Affidabilità e qualità del servizio nei sistemi di distribuzione: localizzazione di eventi originanti fenomeni transitori di tensione sulle reti MT e BT, Procedura di verifiche funzionali di segnalazioni luminose ai fini della sicurezza operativa

3) Utilizzazione dell'energia elettrica

Studi di compatibilità elettromagnetica nei sistemi ferroviari Alta Velocità/Alta Capacità, Sistemi di mobilità sostenibile per il trasporto urbano: trasporto elettrico di massa su ferro e su gomma, Analisi della domanda di utenze residenziali, civili e terziarie, Sistemi elettrici aerospaziali - sistemi elettrici aeronautici, Sicurezza gestione e manutenzione degli impianti elettrici, Studio dell'impianto di protezione dalle scariche atmosferiche per complessi di edifici, Building automation e fonti rinnovabili, L'incidenza della domotica e della building automation nella prestazione energetica degli edifici, Edifici ad energia quasi zero, Microgrid e smartgrid, Zolfo corrosivo negli oli isolanti, recenti guasti e possibili contromisure, Standardisation of Transformer Oils, PD Characteristics of Transformer Oil.

Sulle tematiche citate sono state prodotte numerose pubblicazioni in ambito nazionale ed internazionale consultabili sui più importanti motori di ricerca scientifica quali IEEE Explore, Scopus, ISI, ecc. I componenti dell'Unità partecipano a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali.

Nel dipartimento ha sede un Chapter dell'IEEE Industry Application Society.

L'unità aderisce al Consorzio interuniversitario nazionale per energia e sistemi elettrici Ensiel.